

**ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC**

**MÉMOIRE DE MAÎTRISE PRÉSENTÉ
À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA PRODUCTION AUTOMATISÉE
M.Eng.**

**PAR
SIMON LUPIEN**

**DÉVELOPPEMENT D'UN LOGICIEL D'AIDE À LA CONCEPTION POUR LES ROBOTS
QUADRUPÈDES**

MONTREAL, 29 NOVEMBRE 2002

© droits réservés de Simon Lupien

**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

**M. Sylvain Lemieux, directeur de mémoire
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure**

**M. Thiagas S.Sankar, professeur codirecteur
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure**

**M. Mario Tétreault, président du jury
Département de génie de la production automatisée à l'École de technologie supérieure**

**M. Louis Lamarche, professeur
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure**

IL A FAIT L'OBJET D'UNE PRÉSENTATION DEVANT JURY ET UN PUBLIC

LE 3 OCTOBRE 2002

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Avant de débiter avec les informations technologiques et les sujets pratiques, j'aimerais remercier les personnes qui m'ont appuyé dans le développement de ce travail. Tout d'abord, je désire remercier M. Thiagas S.Sankar pour le support moral et le support monétaire, ce qui m'a permis de dévouer plus de temps à cette recherche. Je tiens également à dire merci à M. Sylvain Lemieux qui m'a guidé tout au long de ma démarche, de la précision du sujet à la rédaction. Je remercie aussi M. Mario Tétreault qui m'a permis de prendre de l'expérience dans la profession d'enseignant. Je ne dois pas omettre les personnes qui m'ont supporté de plus près, soit ma femme, Julie Bilodeau, et mes deux filles, Karelle et Lory Jade, pour qui tous mes efforts sont largement récompensés.

Je me dois de remercier l'École de Technologie Supérieur et le CNRSG qui m'ont donné la chance de subvenir au côté monétaire de la démarche de recherche que j'ai entreprise, cette recherche étant exposée à la suite.

DÉVELOPPEMENT D'UN LOGICIEL D'AIDE À LA CONCEPTION POUR LES ROBOTS QUADRUPÈDES

Simon Lupien

(SOMMAIRE)

Ce mémoire présente une approche pratique pour aider à la conception mécanique de robot marcheur utilisant des modèles cinématiques et dynamiques et des tâches à effectuer. Cela permet d'améliorer la conception mécanique du robot marcheur et de valider en partie la faisabilité des composantes.

Le logiciel se compose de trois modules de calcul : le terrain, la mécanique et la démarche. Ces modules permettent de faire l'optimisation du dimensionnement en tenant compte des contraintes physiques du robot et de la tâche à effectuer.

Le logiciel a été appliqué au design d'un prototype de robot marcheur. Les résultats ont été comparé avec d'autres outils de conception tels que Working Model.

L'utilisation d'un plan d'expérience a fait ressortir quelques règles générales de conception. Ces travaux démontrent que, pour la plupart des paramètres de conception, les critères de performance n'évoluent pas de façon uniforme sur l'ensemble du plan d'expérience. L'analyse reste tout de même essentiels.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
REMERCIEMENTS	i
(SOMMAIRE)	ii
TABLE DES MATIÈRES	iii
LISTE DES TABLEAUX.....	v
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES GRAPHIQUES	viii
LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES.....	ix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	5
1.1 Historique des robots marcheurs.....	5
1.2 Principaux axes de développement	8
1.2.1 La mécanique	9
1.2.1.1 Efficacité et performance	10
1.2.1.2 Configuration des pattes.....	13
1.2.2 Le terrain et l'environnement	15
1.2.3 La démarche.....	16
1.3 Aides au design	19
CHAPITRE 2 : MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE	22
2.1 Design de robots marcheurs.....	22
2.2 Processus général de design.....	22
2.3 La situation de design des robots marcheurs	24
2.4 La conception d'un robot marcheur.....	25
2.5 Cahier de charges du logiciel (LADRMQ).....	26
2.6 Cahier de charge pour la conception d'un robot marcheur.....	27
CHAPITRE 3 : MODÉLISATION DES TÂCHES ET DES MÉCANISMES D'UN ROBOT MARCHEUR.....	29
3.1 Modèles et hypothèses	29
3.1.1 La mécanique du robot.....	29
3.1.1.1 Les positions dans l'espace.....	30
3.1.1.2 Les longueurs	31
3.1.1.3 Les masses.....	31
3.1.1.4 Les centres de masses et l'inertie.....	34
3.1.2 Topologie du terrain.....	34

3.1.3	La démarche.....	37
3.1.3.1	La séquence de démarche	37
3.1.3.2	Trajectoire des pattes	41
3.1.3.3	Trajectoire du corps	42
3.2	Développement des modules de calcul et explications.....	43
3.2.1	Cinématique et dynamique du robot	43
3.2.1.1	Force de contact des pattes au sol.....	45
3.2.2	Forme du terrain et sa construction.....	49
3.2.3	Structure et définition de la démarche	53
3.3	Méthode d'utilisation des modules.....	58
3.3.1	Choix des paramètres variables.....	58
3.3.2	Séquence de calcul et optimisation	59
3.4	Validation des modèles	61
3.4.1	Dynamique d'une patte.....	62
 CHAPITRE 4 : APPLICATION DU 'LOGICIEL D'AIDE AU DESIGN DE ROBOT MARCHEUR QUADRUPÈDE' (LADRMQ) SUR LE PROTOTYPE CAPRA...		68
4.1	Démarche d'utilisation	68
4.2	Terrain plat.....	71
4.2.1	Variable de facteur de rendement	71
4.2.2	Hauteur du corps.....	72
4.2.3	Longueur du pas.....	73
4.2.4	Vitesse du corps	74
4.2.5	Longueur de la cuisse.....	75
4.2.6	La hauteur du pas	76
4.2.7	La configuration des genoux.....	77
 CHAPITRE 5 : ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS		80
CHAPITRE 6 : TRAVAUX FUTURS		85
CONCLUSION		86
 ANNEXES		
1 : DÉVELOPPEMENT DES ÉQUATIONS DE CONTACT AU SOL		88
2 : MATRICE DE FORME DE LA COURBE DE TRAJECTOIRE DE LA PATTE SANS CONTACT.....		91
3 : EXEMPLE DE RÉSULTATS DU LADRMQ.....		97
4 : CAHIER DE CHARGES.....		99
5 : AUTRES RÉSULTATS DU LADRMQ		102
6 : RÉSULTATS COMPARATIFS DES CONFIGURATIONS		108
 BIBLIOGRAPHIE		110

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau I Séquence de calcul	59
Tableau II Résistances spécifiques et les différents types	61
Tableau III Données initiales et configuration du robot	70
Tableau IV Résumé des effets de la longueur du pas pour trois hauteurs de corps sur la consommation en énergie.....	74
Tableau V Résumé des meilleurs résultats sur différents terrains en fonction de la résistance spécifique en considérant le cahier de charge	81
Tableau VI Annexe 1 Terrain plat	103
Tableau VII Annexe 2 Terrain varié	105
Tableau VIII Annexe 3 Influence de la configuration des genoux.....	109

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1 Schéma du camion marcheur de GE	6
Figure 2 Robot "walking beam" illustration artistique sur Mars Dr Martin Marietta.	6
Figure 3 Robot P3 de Honda (world.honda.com 2001).....	7
Figure 4 Robot passif de McGeer.....	8
Figure 5 Triangle de supports et marge de stabilité [64].....	10
Figure 6 Résistance spécifique de différents moyens de transport [50].....	13
Figure 7 Posture des quadrupèdes [65]	14
Figure 8 Type de terrain (cours McGill 305-500A).	15
Figure 9 Différentes séquences de dandinement	17
Figure 10 Similitude des énergies de différentes espèces [65].....	18
Figure 11 Simulation sur Working Model d'un robot passif 2D (Garcia et al [62]).	20
Figure 12 Représentation schématique du processus du design.....	23
Figure 13 Capra, robot à 4 pattes, prototype. (ETS)	27
Figure 14 Prototype Haedus.	28
Figure 15 Représentation des référentiels.	30
Figure 16 Longueur des liens.	31
Figure 17 Pendule inversé simple.....	32
Figure 18 Influence de la masse des jambes sur le centre de masse du robot.	33
Figure 19 Position des centres de masses.	34
Figure 20 Variété de terrains.	35
Figure 21 Paramètres de la forme générale.	35
Figure 22 Paliers et escaliers.	36
Figure 23 Vue frontale du robot et du terrain.....	36
Figure 24 Différentes séquences de marche et de course. (cours 305-500A 907 McGill)....	38
Figure 25 Représentation par dépôt des pattes.	38
Figure 26 Graphique de séquence.	39
Figure 27 Portion de temps du cycle où les quatre pattes sont au sol.	40
Figure 28 Marge de stabilité.....	40
Figure 29 Posture du corps.	42

Figure 30	Représentation de la modélisation d'une patte (Asada H,et Slotine).	43
Figure 31	Vue du plan XZ et des forces en action.	46
Figure 32	Vue du plan YZ et des forces en action.	46
Figure 33	Vu de dessus plan XY.....	48
Figure 34	Terrain varié montré en vue isométrique(unité mm).	49
Figure 35	Variable de dénivelé et de grandeur de terrain.	50
Figure 36	Variation générale du terrain.....	51
Figure 37	Option d'escalier utilisé.....	51
Figure 38	Limitation du dénivelé latéral.	52
Figure 39	Influence de la limite du dénivelé latéral.	52
Figure 40	Différentes séquences de dandinement [43].	53
Figure 41	Numérotation des pattes vue de dessus.....	54
Figure 42	Numérotation des joints, vu de côté.....	54
Figure 43	Séquence des pattes d'une démarche en +X.....	55
Figure 44	Dépôt et levée de patte selon la séquence.	55
Figure 45	Patte avec lien en série.....	62
Figure 46	Patte à quatre membrures.....	63
Figure 47	Capra	69
Figure 48	Model 3D dans Working Model	83
Figure 49	Résistance spécifique de différents moyens de transport.....	84

LISTE DES GRAPHIQUES

	Page
Graphique 1	Trajectoire d'une patte dans les airs. 41
Graphique 2	Trajectoire et les points de contrôle. 57
Graphique 3	Cycle des forces de contact au sol. 64
Graphique 4	Force de contact par Working Model. 65
Graphique 5	Comparaison du couple à la hanche en fonction du temps. 65
Graphique 6	Comparaison des couples dans la phase de débattement. 66
Graphique 7	Influence du rapport de rendement sur la résistance spécifique. 71
Graphique 8	Résistance spécifique en fonction de la hauteur du corps..... 72
Graphique 9	Résistance spécifique en fonction de la longueur du pas..... 73
Graphique 10	Résistance spécifique en fonction de la vitesse du corps..... 75
Graphique 11	Résistance spécifique en fonction de la longueur de la cuisse..... 76
Graphique 12	Résistance spécifique en fonction de la hauteur du pas. 77
Graphique 13	Résistance spécifique en fonction de la configuration des genoux..... 78
Graphique 14	Résistance spécifique en fonction du rapport de rendement dans le plan d'expérience. 79

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SIGLES

RR	Rapport de rendement
RS	Résistance spécifique
MS	Marge de sécurité
CG	Centre de gravité
LADRMQ	Logiciel d'aide au design de robot marcheur quadrupède
DDL	Degré de liberté
g	Accélération gravitationnelle, (m/s²)
ϵ	Résistance spécifique
P	Puissance moyenne, (Watt)
w	Masse, (kg)
v	Vitesse de déplacement du corps du robot, (m/s)
M_i	Composantes de masse des liens du joint i à i+1, (kg)
θ_i	Composante de position angulaire du lien i, (degré)
$\dot{\theta}_i$	Composante de vitesse du lien i, (m/s)
$\ddot{\theta}_i$	Composante d'accélération du lien i, (m/s²)
G_i	Composantes des forces gravitationnelles qui influencent le couple au joint, (Nm)
H_{ij}	Composantes des influences inertielles sur les liens, (Kgm²)
Tau_i	Composantes des couples de réaction des forces de contact sur le lien i, (Nm)
R_i	Somme des couples gravitationnels, centrifuges et centripètes, (Nm)
u	Vitesse, (m/s)
h	Longueur caractéristique(e. g. longueur de patte), (m)
F_c	Force gravitationnelle qui s'exerce sur le corps du robot, (N)
Ac	Force d'accélération du corps, (N)
F_i	Forces de réaction du sol face à la force gravitationnelle qui s'exerce sur le corps du robot, (N)
A_i	Forces de réaction qui s'exercent sur les pattes afin de générer l'accélération sur le corps, (N)
x_i	Correspond aux positions des pattes en fonction de l'axe x et la référence qui est le CG du corps, (m)
y_i	Correspond aux positions des pattes en fonction de l'axe y et la référence qui est le CG du corps, (m)
z_i	Correspond aux positions des pattes en fonction de l'axe z et la référence qui est le CG du corps, (m)

INTRODUCTION

Généralités

La robotique est un sujet d'intérêt dans les centres de recherche et les industries. Les chercheurs s'appliquent à repousser les limites technologiques pour étendre les capacités et améliorer les performances. En industrie, les robots sont utilisés pour remplacer les humains dans des tâches répétitives ou dangereuses. La robotique d'aujourd'hui est grandement influencée par les besoins de l'industrie.

Les robots se classent dans différentes catégories. Les bras manipulateurs sont communs. Les robots cartésiens, dont font partie les commandes numériques, sont aussi en grand nombre. La robotique mobile est de plus en plus présente dans l'industrie.

La robotique mobile a entre autre but le transport de matériel, la surveillance et la manipulation d'objets à distance. Le transport d'une réserve d'énergie est une considération importante pour l'autonomie. Leurs environnements de travail sont variés, allant d'édifices à bureaux à la forêt. Les méthodes de déplacement au travers de ces environnements définissent deux classes de robots mobiles : les rouleurs et les marcheurs.

Les rouleurs ont déjà des représentants dans les milieux industriels et sont souvent présentés sous l'appellation d' «Automated Guided Vehicle» (A.G.V.) . Ces robots rouleurs sont développés pour faire du transport de marchandises ou pour agir comme agent de sécurité. Ces véhicules sont très performants dans des environnements où les planchers sont plats, comme dans les édifices. Grâce aussi au roulement qui les caractérisent, ces robots sont très stables et possèdent un mouvement très prévisible dans l'ensemble des situations qui ne les font pas déraiper ou perdre contact avec le sol.

Quant à eux, les robots marcheurs ont pour objectif de permettre des déplacements dans des environnements accidentés et très variables. Leur méthode de déplacement est calquée la plupart du temps sur la nature. Cette approche permet une grande flexibilité de mouvement, comme par exemple le déplacement latéral et le déplacement sur des plans inclinés. Ils font l'objet de plusieurs études dans les centres de recherches.

La recherche sur les robots marcheurs s'oriente surtout sur la marche bipède, le contrôle par réseau de neurones [6], les sauteurs [7] [19] et la vision [9]. La majorité des robots marcheurs sont employés en recherche. Dans leurs cas, la technologie qui les compose dépend de plusieurs domaines, qui sont utiles en entier, tels que la mécanique, l'électronique, le contrôle, la vision et l'intelligence artificielle. Les applications réelles pour l'industrie en sont encore à leurs débuts.

Les robots marcheurs sont décrits par certaines caractéristiques telles que l'autonomie, la vitesse maximale, la charge transportable et la mobilité. Celles-ci sont plus ou moins importantes selon l'application. Plusieurs applications pourraient servir d'exemple : le travail dans les mines, le déminage, l'exploration planétaire, la sécurité dans des centrales nucléaires, l'aide policière et l'exploitation forestière.

Une des tâches de l'exploitation forestière est le marquage sélectif d'arbres et de l'éclaircissement des zones environnantes. Cette application nécessite un déplacement dans la forêt sans briser ou abîmer les plantes pour leur permettre une croissance plus rapide. Les robots doivent donc enjamber des obstacles ou les contourner selon les circonstances. Il est, par ailleurs, utile de transporter une charge qui peut être composée d'outils ou d'autres éléments essentiels. Le lieu de travail est souvent éloigné du lieu de ravitaillement. La source d'énergie est donc un facteur important. Par contre, trouver l'équilibre de ces différents paramètres amènent des difficultés de conception.

Pour répondre aux besoins de l'industrie, il faut aborder les difficultés de conception. L'ajustement des paramètres pour une application particulière est complexe. Plusieurs paramètres sont « inter-reliés ». Par exemple, pour une même dépense énergétique, plus le robot et sa charge sont lourds, plus petite sera sa vitesse maximale. Notre objectif de recherche est de développer des outils d'aide à la conception pour les robots marcheurs.

La conception d'un système mécanique aussi complexe peut-être simplifiée en subdivisant la problématique. La structure mécanique est un des éléments importants à considérer. Il est l'objet de notre recherche. Une autre raison d'avoir choisi la mécanique est que peu de recherches ont porté spécifiquement sur ce sujet. Les outils disponibles sont rares ou non spécifiquement adaptés à cette problématique.

Objet de la recherche

La conception mécanique est un processus comportant plusieurs étapes. Une des étapes consiste à ajuster les paramètres, ce qui est obtenu par itération. Les étapes requièrent des calculs et peuvent être facilitées par l'utilisation de logiciels. Le logiciel fait donc l'optimisation des paramètres en fonction de certains critères.

L'optimisation est un des objectifs; mais pour y arriver, il y a des paramètres à définir et des calculs à réaliser. Les paramètres, tels que la longueur des pattes, la hauteur du corps, la longueur du corps et longueur des pas, servent d'entrées au modèle. Ceux-ci sont utilisés à l'intérieur d'une simulation afin de calculer des résultats tels que la position, la vitesse, les couples au moteur et la puissance du système. La simulation permet en plus la représentation graphique du déplacement du robot dans son environnement.

Afin de limiter la tâche de la modélisation, un type de robot en particulier a été choisi: le quadrupède. Ce type de robot est intéressant car il possède la quantité de pattes minimum pour marcher de façon statiquement stable. D'autre part, ces travaux s'inscrivent dans un projet plus vaste, Capra, qui s'intéresse à la phase de conception et les développements présentés dans ce mémoire ont contribué à l'optimisation du robot.

Pour pouvoir optimiser les paramètres du robot, il est nécessaire de considérer une simulation globale où le robot se déplace au travers d'un terrain. Cette simulation comporte des éléments qui constituent des aspects différents de la problématique. Le logiciel qui sert à la simulation est donc décomposé en trois modules de calcul, afin de représenter ces différents aspects, soit la structure mécanique, l'environnement et la démarche.

La configuration mécanique comprend tout ce qui compose le robot et ce qui lui permet de bouger. Les pattes, les moteurs, le corps et les articulations sont les éléments les plus importants. Ces éléments doivent être déterminés en quantité et en dimension. Les problématiques reliées à la mécanique proviennent des performances souhaitées. Les paramètres des pattes sont influencés par les besoins en fonction de la stabilité, de la charge à transporter et de la complexité et de la fiabilité des systèmes. Combien d'articulations par pattes seront actionnées et quel type d'énergie utiliseront-ils? Ces petites questions ont de grandes implications. Les différents choix sont aussi influencés par l'environnement et la démarche.

L'environnement est pour sa part la représentation du sol sur lequel le robot doit se déplacer. Les robots marcheurs ont pour objectif de se déplacer en terrain accidenté. Il faut donc tester le comportement des robots sur plusieurs terrains. Pour ce faire, il est préférable de modéliser ces environnements et les robots en simulation. Beaucoup de robots sont testés en terrain plat, puis ensuite sur de petites dénivellations. Il faut aller plus loin et valider le comportement des robots marcheurs dans une variété de terrains qui incluent les escaliers et les terrains irréguliers. Par ces tests, il est possible de constater que le terrain influence les démarches possibles.

La démarche correspond à la façon que le robot déplacera. Autrement dit, la démarche décrit l'enchaînement des pas afin de permettre au robot d'avancer tout en maintenant son équilibre. La marche est un mouvement lent qui est des plus efficace lors du transport d'une charge, alors que la course ou le saut correspondent à des mouvements rapides. Les obstacles doivent être contournés ou bien enjambés. Ceci amène que le choix de la trajectoire du robot dépend de la position du corps dans l'espace ou de la position des points d'appuis au sol. Afin de transporter des charges, le robot se doit d'être stable au niveau du corps. Il est important de bien concevoir la mécanique pour que la stabilité de la démarche ne nécessite pas trop d'énergie à maintenir.

Dans les chapitres suivants, un historique des robots marcheurs sera présenté et sera suivi de l'état des recherches actuelles ainsi d'une synthèse des besoins à combler. Le chapitre deux décrit le processus de conception et de la démarche utilisée. Le chapitre trois explique les modèles mathématiques utilisés. Dans le chapitre quatre, ces outils développés seront mis à l'épreuve afin d'aider à la conception d'un robot qui porte le nom de Capra. Les résultats sont ensuite analysés et interprétés. Les recommandations et une conclusion viennent compléter le tout.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Historique des robots marcheurs

Les premiers dessins ou mécanismes marchants ont été réalisés vers la fin du 18^{ème} siècle. Une évolution simultanée des robots marcheurs bipèdes et à plus de deux pattes s'est déroulée depuis les années 1960.

L'intérêt des chercheurs pour les robots marcheurs n'est pas nouveau. Dans les années 1960, la compagnie General Electric [20], a présenté le prototype d'un camion marcheur à quatre pattes complètement hydraulique avec des commandes analogiques (figure 1). Ce prototype était commandé par un opérateur dans la cabine de pilotage. Il ajustait la position des pattes avant et arrière avec ses bras et ses jambes. Ce robot ne possédait aucun ordinateur. Il utilisait un moteur à combustion de 67 kW qui lui permettait de marcher à une vitesse de 5 Mph et de transporter une charge de 230 kg.

Par la suite, dans les années 1970, les robots à apparence d'insecte comme les fourmis sont apparus, possédant de six à huit pattes. Ce nombre de pattes leurs permet d'avoir des démarches statiquement stables, plus naturelles et plus rapides (Ohio State University) [3], [36]. Les systèmes électriques n'étaient pas tous intégrés sur le robot car les composantes étaient encore trop grosses.

Au début des années 1990, un groupe à l'Université Carnegie Mellon a développé[31] un robot marcheur assez différent, une *table marchante* (figure 2). Ces robots ont des systèmes à double base avec de multiples supports et qui ne ressemblent à aucun être vivant, mais qui sont simples et énergiquement efficaces. Ces robots sont très stables grâce à leur grand nombre de pattes qui agissent ensemble. Cependant, ils sont lents et ont une démarche saccadée.

L'évolution des technologies à partir de 1994 a amené des chercheurs comme Kimura [10] à concevoir des robots à forme d'animaux dans le but d'atteindre une plus grande fluidité de mouvement. Le contrôle de ces robots se fait par des réseaux de neurones. Une méthode qui tente d'imiter non seulement la démarche, mais aussi la structure de contrôle que les êtres vivants utilisent.

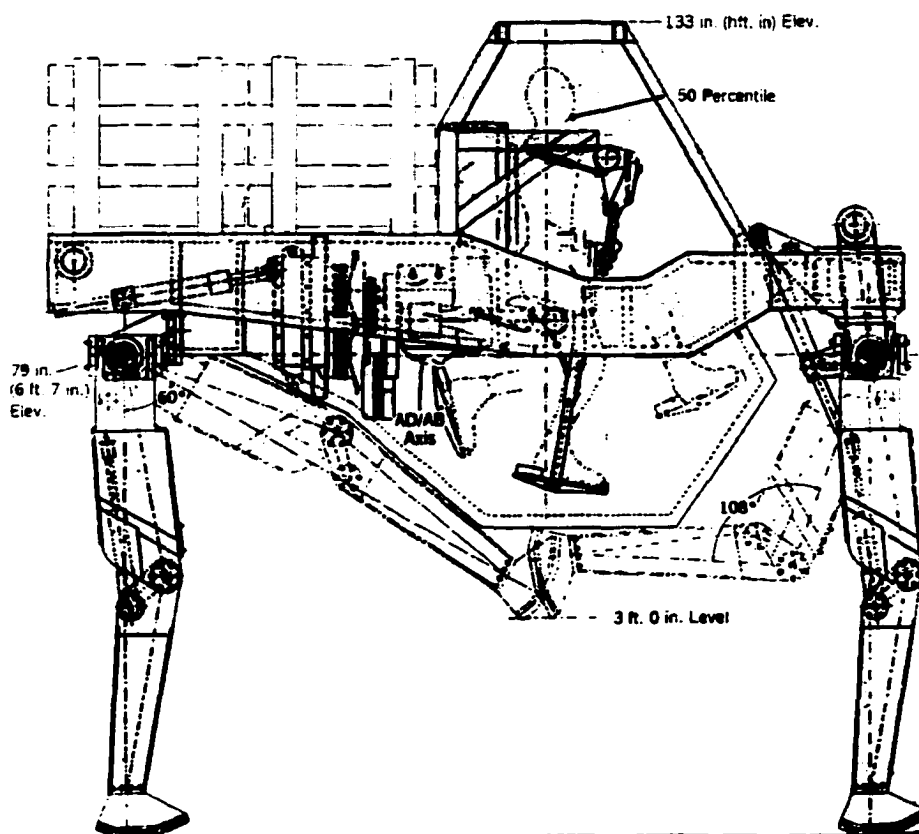


Figure 1 Schéma du camion marcheur de GE



Figure 2 Robot "walking beam" illustration artistique sur Mars Dr Martin Marietta.

L'étude de la consommation en énergie des muscles de l'homme a été faite par Margaria [16] en 1960 afin de mieux comprendre les besoins des différentes démarches. Il fait la comparaison de la consommation en énergie et l'effort mécanique de la marche et de la course. Ceci a permis de mieux connaître le corps humain et ses mouvements. Par la même occasion, les besoins des robots bipèdes se précisaient, comme la démarche, la dépense énergétique dans les séquences de mouvement et l'utilisation du centre d'équilibre.

McMahon [29] a étudié en 1975 plusieurs animaux quadrupèdes afin de découvrir les relations entre la dépense énergétique et le dimensionnement des corps. Ces recherches ont permis de mieux connaître les modes de déplacement des animaux et des êtres humains. Ces recherches ont aussi permis la définition de facteur de proportion, comme la longueur de pas normale en considérant la longueur de la patte.

Les robots de type humanoïde comme C3PO¹ n'existent pas encore, mais des récents développements ont permis de grandes choses. Des prototypes comme le P3 ou Asimo de Honda (figure 3) se démarquent par leur fluidité de mouvement, très ressemblant à la démarche humaine. Ces robots sont composés d'une vingtaine [5] d'actionneurs qui demandent de grandes dépenses en énergie. L'autonomie est d'autant limitée si on considère les 25 minutes du P3.

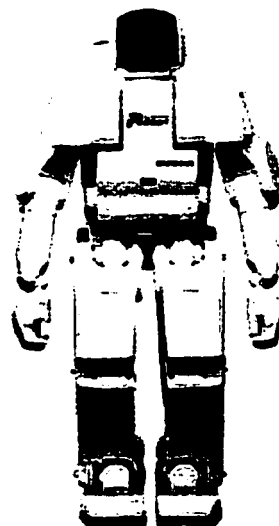


Figure 3 Robot P3 de Honda (world.honda.com 2001).

¹ Robot humanoïde traducteur de la série Star Wars produite par George Lucas.

Les recherches de McGeer en 1990 ont aussi montré que les bipèdes pouvaient être très simples. Ces recherches ont démontré qu'il est possible d'utiliser l'énergie accumulée pour faire marcher un robot sans utiliser aucun actionneur. Ces robots sont définis sous l'appellation de robots passifs [20], [32]. Ces robots bipèdes se déplacent avec la seule aide de la gravité. Leur mode de déplacement est de descendre des plans inclinés et ils ressemblent au robot sur la figure 4.

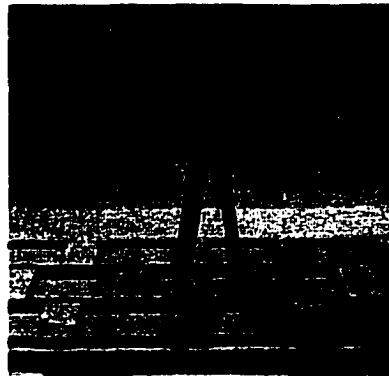


Figure 4 Robot passif de McGeer.

Ces robots démontrent la simplicité et l'efficacité. Pas besoin de source d'énergie car aucun actionneur n'est utilisé, mais il faut comprendre qu'aucun paramètre de la démarche ne peut être contrôlé. Il est intéressant de se rapprocher de cette démarche tout en conservant le contrôle de la démarche.

Beaucoup de robots marcheurs ont été construits ces 40 dernières années. Ils ont tous, à un moment ou à un autre, aidé à résoudre des problématiques de contrôle, de mécanique ou de démarche. Les développements de certaines recherches sont plus pertinents à mentionner, car ils constituent de bonnes bases pour l'amélioration de la conception de nouveaux robots.

1.2 Principaux axes de développement

L'étude des robots marcheurs est un domaine de recherche vaste et multidisciplinaire. Afin de clarifier et mettre en évidence les éléments les plus pertinents à la présente recherche, trois axes de recherche seront présentés ici, soit la mécanique, le terrain (ou environnement) et la démarche. Ensuite les logiciels d'aide au design et les méthodes d'optimisation seront abordées.

1.2.1 La mécanique

L'équilibre est un sujet courant quand il est question de la marche. L'équilibre du robot dans ses déplacements est un des critères les plus importants dans la conception d'un robot marcheur. L'équilibre n'est pas tout à fait le bon terme à utiliser ici, c'est plutôt la stabilité qui doit être utilisée. Différentes recherches ont porté sur les robots statiquement stables et d'autres sur les robots dynamiquement stables. Ces différents termes seront décrits séparément pour bien faire la distinction.

La stabilité est l'état dans lequel un mécanisme tend à rester. La présence de perturbation peut déplacer le robot par exemple, mais ne peut pas le faire tomber.

Un quadrupède peut être dynamiquement stable et statiquement stable. Pour être statiquement stable, il faut avoir un minimum de trois points de contact avec le sol ou autre surface et que la projection du centre de gravité sur cette surface se situe à l'intérieur du polygone formé par les points de contact au sol. Il faut aussi que le corps soit immobile ou encore bougeant à vitesse constante en ligne droite.

Un bipède peut difficilement être statiquement stable, puisqu'il n'a que deux points de contact, à moins d'avoir de très grands pieds [63]. La notion de dynamiquement stable s'applique alors au bipède et à tout moment où le nombre de points de contact est inférieur à trois ou que la projection du centre de gravité n'est plus à l'intérieur du polygone de support.

Pour être dynamiquement stable, il faut que la résultante de la somme des forces se situe à l'intérieur du polygone de support. La somme des moments doit aussi être égale à 0. Dans le cas des bipèdes, il est souvent question du Z.M.P., "Zero Momented Point" (point des moments à zéro). Goswami [43] s'est penché sur la question pour en faire un résumé qui englobe les différentes définitions. Le Z.M.P. correspond à un point au sol où la somme des forces de gravité et d'inertie touche le sol. Si ce point reste sous la semelle de support ou polygone de support, le robot est donc dynamiquement stable.

Cette technique est utilisée pour presque tous les robots ayant un nombre de pattes inférieur ou égal à quatre ou lorsqu'il n'est plus question d'être statiquement stable. Certains font tout de même une analyse statique des forces des robots qui se déplacent dynamiquement.

Plusieurs d'études [1, 2] ont été réalisées sur des robots dont la démarche est statique. Elles se font sur des robots à six ou à huit pattes en majeure partie, puisqu'il est beaucoup plus facile de garder ce type de robot en équilibre statique, surtout quand il y a plus de trois pattes qui peuvent être en contact avec le sol en même temps. Le centre de gravité (CG) est donc à l'intérieur du polygone de support qui est ainsi formé (figure 5). Et on utilise la notion de marge de stabilité afin de représenter la distance entre la projection du CG et les limites du polygone de support.

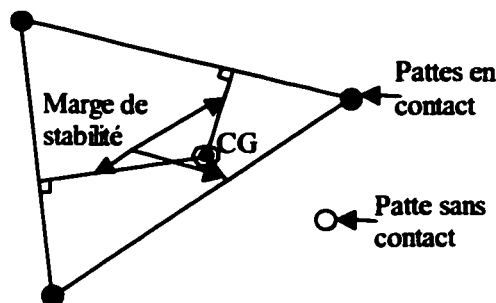


Figure 5 Triangle de supports et marge de stabilité [64].

Lorsque le corps n'est pas en mouvement ou lorsqu'il évolue à une vitesse constante et que la projection du CG est située à l'intérieur du polygone de support, la somme des moments et forces sur le corps est donc égale à 0. Avoir plus de trois pattes permet d'augmenter la grandeur du polygone et ainsi augmenter la marge de stabilité.

Les quadrupèdes sont polyvalents car plusieurs démarches sont possibles. Ils peuvent avoir en tout temps trois pattes au sol et ainsi marcher de façon statiquement stable et de ce fait, transporter des charges comme le font bien des animaux à quatre pattes. Il est aussi utile de dire que les quadrupèdes marchent à la limite de la stabilité. Comme le montre la figure 5, le changement de patte en support se produit quand le C.G. est sur ou près de la diagonale de support, ce qui laisse peu de place à l'erreur ou au faux pas.

1.2.1.1 Efficacité et performance

La mécanique est directement reliée aux performances souhaitées du robot. Certaines recherches ont montré l'influence de la mécanique sur la consommation d'énergie et par la suite, l'intérêt de cette approche a amené d'autres recherches sur ce sujet particulier.

L'équipe de Martin Buehler [48],[49],[50] au laboratoire ARL de l'Université McGill a développé deux «monopodes» (Carl et ARL) afin de rendre la mécanique plus efficace et permettre l'utilisation d'un moteur électrique. La réduction de la consommation d'énergie est l'objectif principal de leur étude de la mécanique. Ils sont parvenus à faire une patte qui saute en utilisant très peu d'énergie. Ces deux prototypes sont nés de l'analyse du saut et des besoins mécaniques d'un robot planaire quadrupède. La simulation leur a permis de déterminer exactement les besoins énergétiques de chacune de leurs composantes mécaniques. Cette recherche montre qu'il est important de faire l'analyse de la mécanique et de l'ensemble de la démarche. Pour un «monopode», la seule démarche est le saut. Notre recherche ne porte pas sur le même type de mécanique. Il suggère, par contre, une façon d'évaluer les performances de n'importe quel type de véhicule.

Pour évaluer la performance d'un robot, il est intéressant de le comparer avec d'autres. Pour ce faire, il est souhaitable de ne pas utiliser que la consommation en énergie, mais aussi la vitesse et la masse du véhicule. Si l'analyse ne se fait que sur la consommation d'énergie, le robot devrait être le plus petit possible. Un paramètre qui représente toutes ces données est la résistance spécifique ϵ définie par Gabrielli et Von Kármán [52]. Pour une puissance totale P , un poids total w et une vitesse v , la résistance spécifique est définie comme suit:

$$\epsilon = \frac{P(v)}{wv} \quad (1.1)$$

Ce rapport permet de comparer les robots marcheurs entre eux mais aussi les êtres vivants et d'autres sortes de véhicule terrestre. Plusieurs auteurs utilisent ce rapport pour comparer leurs résultats de recherche. Il faut faire attention, car dans la littérature, les paramètres de puissance et de masse sont utilisés de deux façons différentes. Ceci engendre plusieurs variantes de la définition de la résistance spécifique. Dans la littérature il y a quatre types de résistance spécifique (ϵ) qui sont faites pour comparer des sortes de véhicule entre eux. Il faut définir la terminologie et les différents type de RS:

- *La puissance moyenne totale* est la puissance nécessaire au déplacement et aux autres fonctions du véhicule en mouvement.
- *La puissance moyenne net* est la puissance pour permettre le déplacement seulement.

- *La masse totale* est la masse du véhicule plus celle de la charge transportée.
- *La masse nette* est la masse de la charge seulement.

Les différents types qui suivent utilisent les terminologies énoncées et expliquent de façon globale dans quelle situation de comparaison elles sont utilisées.

- Type un : Correspond à l'utilisation de la *masse totale* et la *puissance moyenne totale*. Il a souvent été utilisé pour la comparaison de différent moyen de transport.
- Type deux : Correspond à l'utilisation de la *masse nette* et la *puissance moyenne totale*. Ce type montre l'efficacité pour transporter une charge en comparaison avec le type un.
- Type trois : Correspond à l'utilisation de la *masse totale* et la *puissance moyenne nette*. Ce type représente la consommation nette des animaux par exemple.
- Type quatre : Correspond à l'utilisation de la *masse nette* et la *puissance moyenne nette*. Ce dernier type représente l'efficacité du transport d'une charge.

La résistance spécifique et la puissance sont des critères d'optimisation de la mécanique. Une diminution de la puissance entraîne une réduction de e , ceci en considérant les autres paramètres fixes. Il est aussi possible de réduire e en modifiant les paramètres de vitesse et de poids. La puissance n'est donc plus le seul paramètre à optimiser. Buehler et d'autres chercheurs ont utilisé la résistance spécifique afin de comparer leurs résultats. La figure 1.6 représente les données de Gabrielli et Von Kármán et quelques robots marcheurs existants.

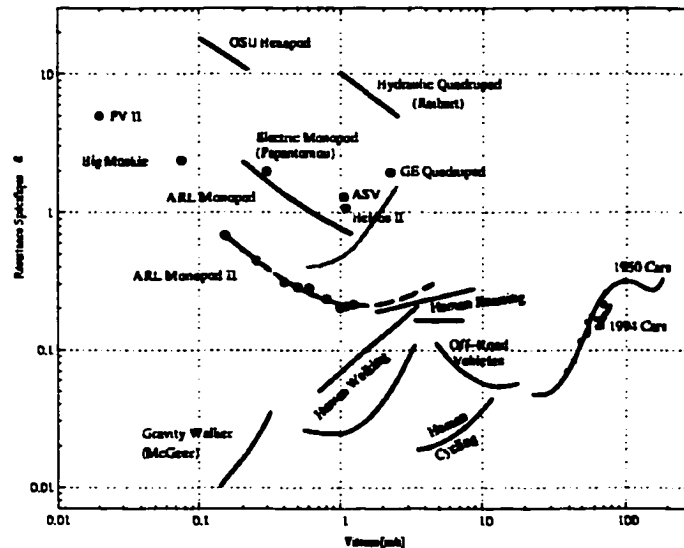


Figure 6 Résistance spécifique de différents moyens de transport [50]

Le poids et la vitesse du robot dépendent en grande partie du nombre de pattes. Plusieurs possibilités de nombre de pattes ont été analysées, d'une à huit pattes. Chaque robot a des qualités et des défauts qui permettent de répondre à des besoins particuliers. Un robot à huit pattes est plus stable qu'un quadrupède, mais il consomme plus d'énergie en considérant un même nombre d'axes par patte. Un robot à une patte est très rapide et économique en énergie, mais il ne transporte pas ou peu de charge.

Le nombre de pattes est donc parmi les premiers choix stratégiques qui déterminent le point de départ d'une recherche, tout en tenant compte des objectifs à atteindre. Ensuite, il est nécessaire de déterminer la configuration des pattes où il faut faire les choix d'actionneurs.

Le nombre de pattes influence la démarche, mais le nombre d'axes par patte peut aussi influencer la démarche. Pour un nombre donné de pattes, plusieurs configurations sont possibles.

1.2.1.2 Configuration des pattes

La configuration des pattes est caractérisée par le nombre de degrés de liberté, de leurs orientations, ainsi que par le type de joints pour chaque articulation. En comparant toute la

panoplie des robots existants, le niveau de la complexité de la configuration des pattes varie. En effet, le nombre d'articulations varie de un [51] à six [5] par patte.

La configuration des quadrupèdes se divise en trois groupes qui sont illustrés à la figure 7. La position des articulations mais surtout leurs orientations changent. La majorité des animaux ont trois ou quatre articulations majeures par patte. La hanche est souvent composée de deux articulations, il y a ensuite le genou et la cheville.

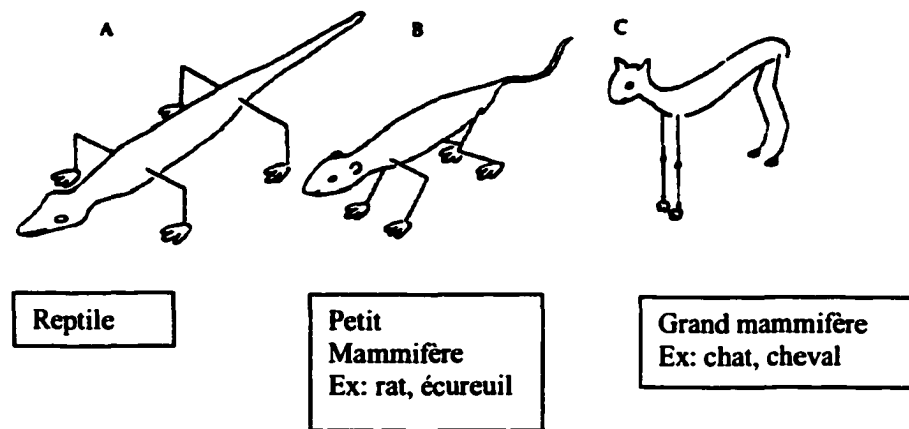


Figure 7 Posture des quadrupèdes [65]

Les reptiles utilisent les mêmes démarches que les grands mammifères, mais la zone où les pieds sont posés n'est pas la même par rapport au corps. La forme des pas peut pourtant être la même pour des pattes de même longueur.

Les robots qui marchent n'ont pas tous besoin de pieds. L'articulation à la cheville permet deux choses, l'orientation du pied en fonction de la surface de contact et la compensation du ZMP.

La majorité des expérimentations faites sur les quadrupèdes [2],[10],[51] ne considèrent pas le besoin d'un pied articulé. Les robots statiquement stables ont moins besoin de compenser la position du centre de gravité, car leur démarche leur permet de le situer au-dessus du polygone de support. D'autre part, les robots quadrupèdes, pour rester en équilibre, ont seulement besoin de positionner leurs petits pieds et non de les orienter. L'ajout de cheville active permet encore plus

de stabilité, mais augmente la quantité de mécanique nécessaire et de fait, la consommation en énergie.

La configuration minimum pour obtenir un positionnement des points de contact comme dans le cas de Pathrush [25], un robot planaire, est d'avoir deux d.d.l.s par patte. Cette configuration ne permet que la marche en ligne droite, à moins de considérer les dérapages. La configuration influence la zone de travail de la patte et force une certaine démarche.

Les articulations linéaires sont plus faciles à représenter mathématiquement, mais elles demandent plus de composantes mécaniques [49] que les articulations rotoïdes.

1.2.2 Le terrain et l'environnement

Le type de terrain sur lequel le robot doit évoluer fait partie de la description de la tâche à accomplir. Il est important de définir la tâche pour pouvoir évaluer les performances que doit rencontrer le robot. Les robots marcheurs ont comme intérêt principal la capacité de se déplacer dans des terrains variés et accidentés.

Il est utile de définir et de caractériser les terrains. La figure 8 regroupe les terrains en cinq types. Le terrain plat est défini comme un type O, alors que les types P et H représentent respectivement des bosses et des trous. Le type G est un cas particulier puisqu'il représente des terrains à paliers, c'est à dire avec des bosses et des trous, mais sans formes irrégulières et où les surfaces sont toujours horizontales.

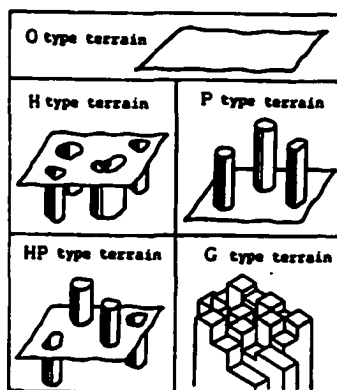


Figure 8 Type de terrain (cours McGill 305-500A).

Il est important de faire la modélisation du terrain, car il est possible de valider par simulation la démarche et la mécanique au travers de la variété de terrains modélisés. Ces simulations sont moins coûteuses que la fabrication de robots. Les terrains nivelés sont les plus couramment parcourus par les humains. Donc, il est important de modéliser des environnements urbains comme des escaliers, des trottoirs et des plans inclinés. Plusieurs chercheurs ont étudié ces sujets [8] [10]. Ces dernières années, des avancements importants ont été réalisés sur la capacité des robots à traverser des terrains variés.

Il est important de modéliser plusieurs terrains afin de valider le déplacement des robots sur ces derniers. La planification de trajectoire diminue les variations observables sur les terrains accidentés. Il est par ce fait même possible de poser l'hypothèse que le terrain sera limité à un certain niveau de variation. Les variations du terrain seront plus globales et moins accidentées permettant une plus facile évolution du robot.

1.2.3 La démarche

La démarche est la méthode de déplacement du robot. Elle comporte à la fois la séquence de dépôt des pattes et la posture du corps dans l'espace. Les robots de plus de quatre pattes peuvent tous utiliser des démarches très similaires [65].

Il est important de connaître les termes généraux afin de comprendre la démarche. Le cycle de chaque patte se sépare en deux phases, le balancement "SWING" et la posture "STANCE". Le balancement est la portion de la séquence où la patte est dans les airs. La posture est le moment où la patte est au sol. Ces deux phases composent le pas ou la foulée.

Le pas se définit de façon globale par quatre paramètres: la longueur, la période, le rapport de rendement (RR) et la hauteur. Ces quatre paramètres permettent de définir l'allure d'un cycle complet d'une patte. La longueur et la hauteur du pas représentent sa forme dans l'espace. La période et le rapport de rendement (RR) décrivent le mouvement dans le temps. La période est le temps nécessaire pour faire un pas. Le RR représente la portion du cycle où la patte est en phase de posture (équation 1.2). Il est défini comme suit :

$$RR = \frac{\text{temps en posture}}{\text{période de foulée}} \quad (1.2)$$

Les robots qui marchent de façon statique utilisent en général deux types de démarche. Ils rampent "crawl" ou se dandine "wave". Les premiers travaux qui ont porté sur la stabilité de ces démarches ont été réalisés par McGhee [61]. Il est connu par ses études et celles de Hirose [6][41] que les démarches périodiques et statiques sont représentées sous six séquences différentes (figure 9).

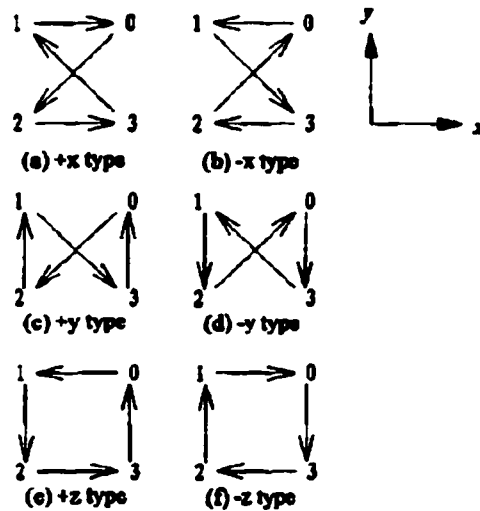


Figure 9 Différentes séquences de dandinement

Les paramètres sont les mêmes d'une séquence à l'autre sauf l'ordre de levée de chaque patte. Elles se reproduisent dans le temps sans se modifier. Ce type de démarche ne s'adapte pas vraiment à des changements brusques d'environnement. Elles sont répétitives et ne considèrent pas de méthode afin modifier leur séquence pour considérer les changements. Afin de compléter ces recherches, certains, comme Jeong et al. [4] ont développé des variations des démarches standards afin de les rendre apériodiques. D'autres [63] ont fait l'analyse afin de faire des changements de séquence. Les démarches statiques périodiques sont très stables dans les conditions qui leur sont propres. Il est possible d'utiliser directement ces recherches pour déterminer une démarche adéquate.

Plusieurs chercheurs ont étudié la marche animale et dérivé des règles de fonctionnement. Par exemple, Mangaria [16], après avoir analysé la démarche d'une multitude d'animaux, évaluait de façon générale la longueur du pas pour la marche à 60% de la longueur total de la jambe. De plus,

selon les travaux de Froude[65], la marche n'est plus efficace énergétiquement après une certaine vitesse. Cette analyse a été réalisée sur plusieurs êtres vivants et leurs démarches. Il sera bon de vérifier la vitesse limite qui est calculé ainsi (équation 1.3).

$$\text{Nombre de Froude} = \frac{u^2}{gh} \quad (1.3)$$

u : vitesse

g : accélération gravitationnelle

h : longueur caractéristique (e. g. longueur de patte)

Les animaux se déplacent de manière dynamiquement semblable pour une même valeur de nombre de Froude. Le changement de type de démarche est représenté pour différents animaux dans la figure 10.

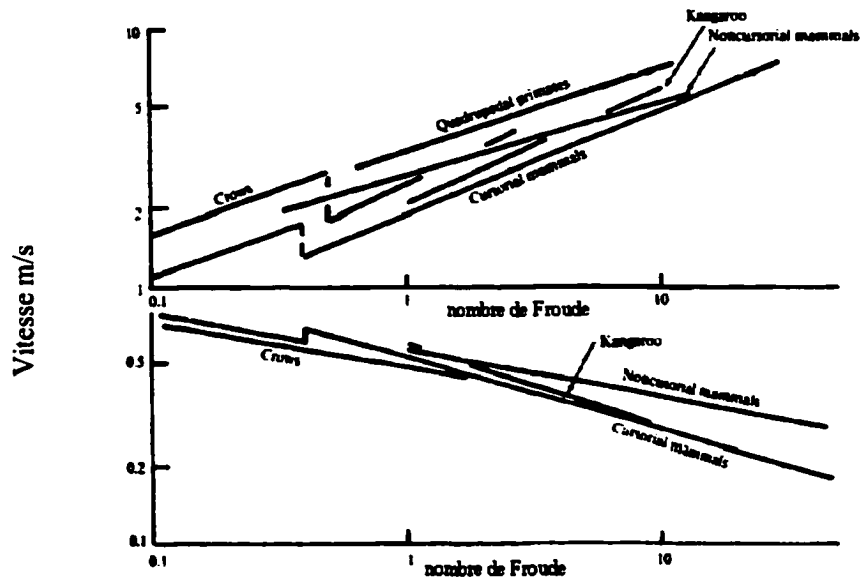


Figure 10 Similitude des énergies de différentes espèces [65].

- À 0.1, toutes les espèces utilisent le dandinement.
- À 0.5, les quadrupèdes (comme les bipèdes) passent de la marche à la course.
- À 1, presque toutes les espèces utilisent une démarche de course symétrique. (trot, pace)
- À 2- 3, presque toutes les espèces passent au galop.

1.3 Aides au design

Les aides au design sont des outils informatiques qui, reliés avec des systèmes de conception assistée par ordinateur (C.A.O.), permettent d'accélérer le processus de conception. Des outils de ce type existent pour des domaines spécialisés. Ces aides permettent de trouver la meilleure solution en considérant les contraintes et les objectifs relatifs au mécanisme à concevoir.

Quelques programmes existent déjà et certains ont même développé des systèmes pour faire l'optimisation de structures robotiques. L'utilisation des algorithmes génétiques est une approche récente pour faire l'optimisation. Il y a aussi les méthodes heuristiques ou par plans d'expériences. Peu de méthodes d'optimisation permettent de faire l'analyse de systèmes aussi complexes que les robots marcheurs. Les plans d'expérience permettent de choisir le ou les paramètres à optimiser plus facilement.

Les algorithmes génétiques (AGs) sont des méthodes par évolution de deux parents afin d'engendrer des enfants meilleurs. Il faut déterminer des objectifs qui permettront de définir ce qui est considéré comme meilleur. Cette approche nécessite non seulement la définition des modèles mathématiques complets mais aussi des algorithmes génétiques de recherche d'un optimum. Ces critères d'optimisations serviront pour choisir les meilleurs parents pour la création de nouvelles progénitures. Il peut se produire des situations où il se crée une dégénérescence des enfants qui sont de moins en moins bons comparativement à leurs parents. Les AGs ont tendance à demander énormément de calculs pour créer des dizaines de milliers d'enfants afin de trouver le meilleur de ceux-ci. Cette méthode est considérée très bonne dans la situation où la problématique est très vaste et que la solution est dans un espace non-linéaire de recherche, par exemple, lorsqu'il n'y a pas d'équation unique pour représenter l'objectif. Il est par contre possible de ne pas trouver de solution, même si l'espace de solution est bien défini. Il n'y a pas d'évidence que les AGs appliqués à la conception de robots marcheurs aient apportés de bons résultats. Malgré de bonne simulation la réalisation mécanique reste une étape difficile à franchir. De plus, il est difficile de considérer les contraintes liées à la réalisation mécanique, aux interférences mécaniques ou à la disponibilité des composantes.

Une recherche a été réalisée par Leger et Bares en 1998 [30]. Elle portait sur l'automatisation et l'optimisation du design de configuration de robots. Elle est plus complète que d'autres

recherches car elle fait l'analyse cinématique et dynamique d'un concept pour trouver une solution optimale. Ils ont démontré leurs résultats par un exemple avec un robot transporteur de matériels qui était sur une base roulante, comme un chariot élévateur. L'approche utilisée est l'algorithme génétique. Selon ces auteurs, cette recherche montre que des logiciels peuvent trouver des solutions à partir de très peu d'informations de départ comme objectif de conception. Pour obtenir un résultat valable, il faut parfois attendre des jours entiers, utilisant des systèmes multiprocesseurs. Le développement des AGs est une recherche en elle même. Le domaine des AGs est tellement vaste que certaines thèses de maîtrise ont porté sur le seul sujet d'ajuster les paramètres de certains algorithmes.

Une autre méthode utilisée par Duane W. Marheka et David E. Orin [45] est de faire un plan d'expérience. Avec les données recueillies de l'efficacité de la marche d'un hexapode, ils ont déterminé des règles de conception. Entre autres, ils ont identifié certaines variables qui ont une influence plus importante. Le plan d'expérience est plus rapide et plus intuitif.

Il existe aussi sur le marché commercial des logiciels de CAO. Des logiciels comme RobCad, Catia, ProEng, WorkingModel, etc, permettent de dessiner et d'évaluer des structures mécaniques en simulation numérique. Ils incorporent toutes les connaissances de la physique mécanique. WorkingModel par exemple a été utilisé dans certaines recherches [51] et [62] afin de simuler de nouvelles techniques de contrôle avant de les implanter dans un robot et pour simuler par exemple l'ajout de joint élastique d'un modèle existant (figure 11).

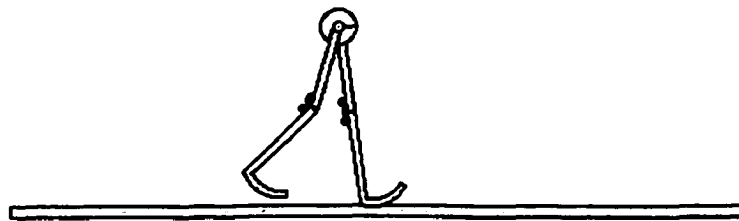


Figure 11 Simulation sur Working Model d'un robot passif 2D (Garcia et al [62]).

Ces logiciels sont faits pour tester la mécanique. Ils n'ont pas tous la connaissance spécifique à un seul un champ d'application. Ces logiciels sont utiles pour simuler et visualiser le comportement du modèle, mais n'offrent pas d'outils conviviaux pour améliorer les performances du modèle.

Les calculs effectués sont numériques et le pas de calcul peut varier en fonction de la complexité du système. Ceci peut rendre les simulations très longues. Certaines définitions de matériaux sont très importantes pour permettre d'obtenir des résultats valables.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE DE RECHERCHE

2.1 Design de robots marcheurs

La méthodologie de recherche utilisée pour ce projet s'inspire du processus de conception en général. Ainsi, afin d'expliquer la méthodologie, les prochaines sections traiteront tout d'abord du processus de design en général. Par la suite, les aspects traitant plus spécifiquement de la conception de robots marcheurs seront abordés. La description du cahier des charges de la conception d'un robot marcheur viendra clore ce chapitre.

2.2 Processus général de design

Comme pour toute conception de mécanisme, il y a des étapes importantes à respecter. Le processus de conception mécanique est décrit par un algorithme comportant une dizaine d'étapes, provenant de 25 ans d'étude des mécanismes de la conception [63] [64]. Le processus de conception se divise en trois groupes d'étapes plus significatifs. Une représentation graphique sous forme d'organigramme fonctionnel est représentée à la figure 12. Cet organigramme représente bien la récursivité du processus de design.

Les premières étapes (1,2) servent à définir le contexte de la conception et à déterminer un cahier des charges. Par la suite (l'étape 3), il faut élaborer quelques solutions préliminaires qui pourront possiblement être validées. La quatrième étape consiste à faire le choix d'une des solutions pour pouvoir continuer le processus de conception. Toutes ces étapes nécessitent l'imagination et l'esprit créatif des concepteurs comme atout principal. Ensuite, il est utile de définir concrètement les idées. La solution est alors précisée (5) pour en déterminer les dimensions complètes. L'analyse mathématique du design suit aux étapes (6 et 7), ce qui permet d'évaluer, par les critères retenus, si la solution satisfait le cahier des charges. Selon les réponses obtenues, des décisions basées sur l'expérience seront prises (étapes 8, 9 et 10). Dans le cas où

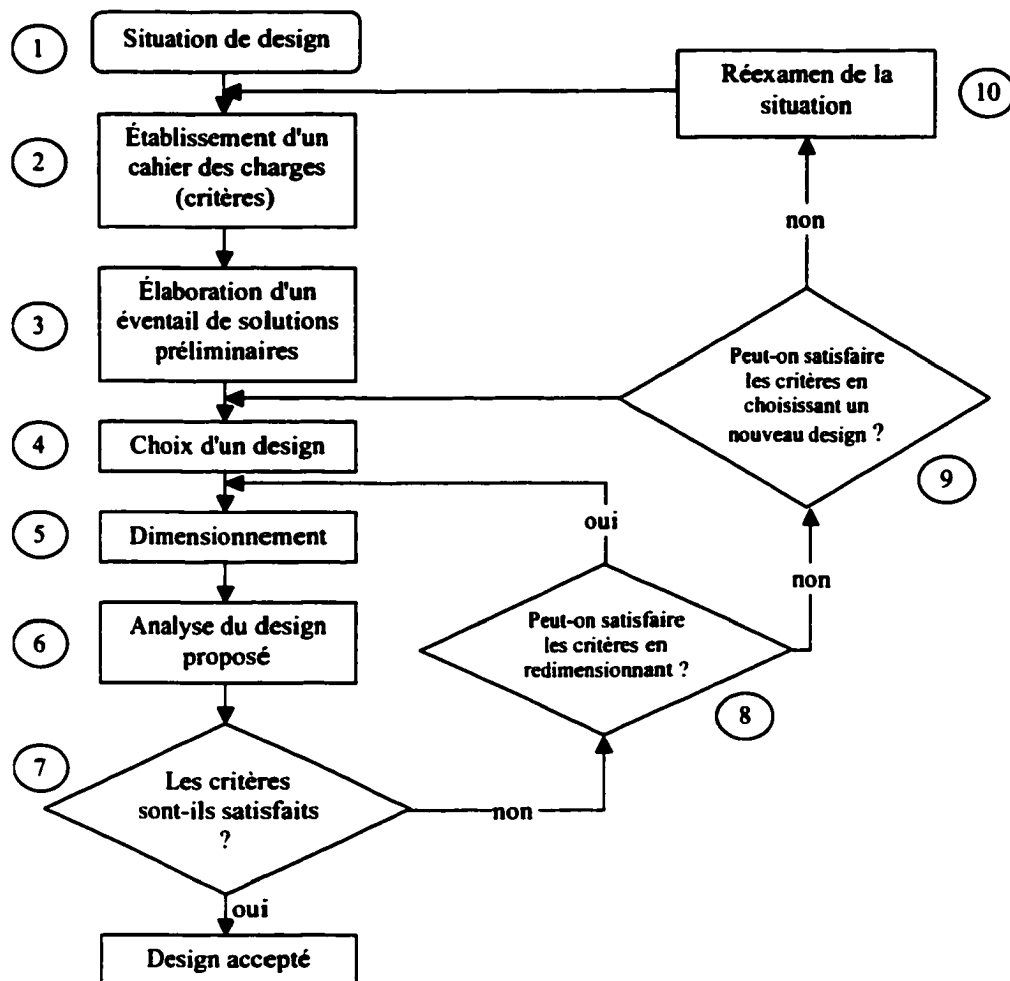


Figure 12 Représentation schématique du processus du design.

les critères seraient satisfaits, il est possible d'accepter le design évalué. Dans le cas contraire, il faut vérifier s'il est possible de redimensionner pour répondre aux critères préétablis. S'il n'est pas possible de redimensionner, alors un nouveau design devra être choisi et le processus recommencera l'étape 4.

La portion plus mathématique, qui correspond aux étapes 6 et 7, nécessite en général beaucoup de calculs. Ces calculs deviennent répétitifs lorsque chaque solution obtenue par l'utilisation d'un plan d'expérience ou d'autres méthodes d'optimisation doit être validée. Ils peuvent être effectués par des logiciels d'aide à la conception, comme dans notre cas. C'est pourquoi ce processus est utilisé et que nous l'appliquons au design d'un robot marcheur.

2.3 La situation de design des robots marcheurs

Les mécanismes qui doivent exécuter toujours la même tâche sont très faciles à analyser puisqu'une seule tâche doit être décrite. Dans le cas des robots marcheurs, il faut prévoir un ensemble d'actions qui seront réalisées afin de connaître et de déterminer les limites de fonctionnement et les conditions moyennes de fonctionnement. Les robots marcheurs doivent se déplacer au travers de terrains ou encore transporter des matériaux et des outils afin d'effectuer des manipulations ou observations dans certains cas.

Pour être exact dans l'évaluation de la mécanique, il faudrait représenter et simuler toutes les actions que le robot peut entreprendre. Ceci nécessite non seulement la description de l'environnement mais aussi des perturbations. Par contre, la première phase est de définir le terrain sans grande perturbation. Le terrain, qui est une des épreuves, peut ainsi être défini globalement.

La mécanique se doit de correspondre aux exigences de l'application. Ces exigences ou caractéristiques peuvent être les suivantes: la charge utile, la vitesse, la zone de travail, l'autonomie, son enjambée, les manipulateurs intégrables et sa versatilité. Quelques-unes de ces caractéristiques n'ont pas vraiment d'influence sur son déplacement.

En mouvement statique, le robot marcheur est comme une table. Plusieurs points d'appuis permettent de déplacer le corps. Il est possible d'analyser le tout comme étant plusieurs segments de liens en série. L'analyse du mouvement doit prendre en considération la dynamique d'une chaîne à plusieurs extrémités pour comprendre tous les phénomènes qui influencent le mouvement. Le mouvement peut être décomposé, contrairement à la démarche dynamique.

La conception de mécanismes demande la validation des conditions limites. Les limites d'une mécanique complexe comme un robot marcheur sont difficiles à déterminer. Une de ces limites est la vitesse maximum que le robot peut atteindre avec une démarche statique. Les efforts aux moteurs font par contre partie des conditions difficiles à évaluer. Les couples maximums au moteur pendant la marche normale ne représentent pas les conditions où le robot tombe et doit se remettre sur pied, ou lorsque le robot frappe de plein fouet un obstacle. Il faut donc observer les conditions normales d'opération et les conditions limites. Ceci permet de bien cerner la problématique et de définir les exigences de l'application.

La démarche des robots a une grande influence sur les performances de celui-ci. La majorité des animaux qui transportent de grandes charges le font à basse vitesse et avec une démarche particulière. En changeant leurs démarches, il est possible de réduire ou d'augmenter les efforts qu'ils ont à fournir. Les conditions préférables doivent donc être la meilleure démarche en utilisant la meilleure planification de trajectoire pour une certaine mécanique choisie. Il s'agit donc des meilleures conditions, mais il faut aussi valider des conditions plus difficiles pour lesquelles les fonctionnalités du robot sont maintenues.

2.4 La conception d'un robot marcheur

Le processus de design a été décrit de façon à pouvoir l'utiliser pour toutes les situations possibles. Il faut utiliser le processus général de design en l'appliquant à la situation particulière de la conception d'un robot marcheur. Voici les étapes du processus qui seront réutilisées.

Déterminer les objectifs	étape 1
Cahier des charges	étape 2
Élaborer un éventail de solutions	étape 3
Étudier les développements antérieurs	
Remue-méninges	
Choisir des mécanismes et configurations	
Déterminer une solution préliminaire	étape 4
Modéliser les objectifs	étape 5
Terrain	
Mode de déplacement (démarche)	
La structure mécanique	
Évaluer les mécanismes	étape 6
Cinématique	
Dynamique	
Trouver une méthode ou des facteurs de comparaison des différents systèmes	
Choisir une solution qui satisfait les critères	étape 7, 8, 9 et 10

Les quatre premières étapes sont essentielles. Elles permettent de bien définir le sujet et la problématique. Elles font partie du cheminement que le concepteur se doit de compléter par lui-

même. Il est difficile de faire un logiciel qui propose des solutions sans en avoir bien déterminé le sujet.

La base repose sur une bonne définition des objectifs et du cahier des charges. Ensuite, il faudra entreprendre l'étape de création qui, dans notre cas, sera faite par d'autres étudiants. La solution préliminaire nous sera fournie, mais nous devrons l'analyser et la décortiquer pour arriver à l'améliorer. Lors de l'analyse, il est possible d'utiliser des outils mathématiques pour optimiser les composantes.

L'utilisation du "Logiciel d'Aide au Design de Robots Marcheurs Quadrupèdes" (LADRMQ) se fera donc dans ce but précis. Il permet de faire les calculs de cinématique et dynamique et aide à l'évaluation des différentes solutions proposées. La consommation en énergie ou plus particulièrement la résistance spécifique (1.2.1.1) est le paramètre utilisé pour évaluer une solution et ainsi l'améliorer. Il permet la définition de solution non évidente et l'influence de certaine variable.

2.5 Cahier de charges du logiciel (LADRMQ)

Le logiciel a pour but de faire les calculs qui permettent de simuler le déplacement d'un robot marcheur. Cette même simulation et ses résultats aident le concepteur dans ses choix. Pour ce faire, le logiciel doit avoir certaines caractéristiques.

Il se doit de faire le calcul de la cinématique du robot en considérant les variations de terrain. Cette cinématique est déterminée par des paramètres qui définissent la démarche. Cette même démarche influence la réaction dynamique du robot. Et la dynamique permet le calcul des efforts demandés au robot ce qui engendre les dépenses en énergie.

Les différents modèles tels que le terrain, la démarche et la mécanique devront posséder des variables qui serviront de paramètres pour l'optimisation. La solution recherchée est composée d'un domaine de paramètres qui dépendent de la solution préliminaire et des objectifs demandés. Les paramètres de la mécanique sont à la fois des variables mais aussi les données et les résultats de l'optimisation.

Les résultats escomptés qui permettent la validation sont en grande partie reliés aux actionneurs. La vitesse, l'accélération, l'amplitude et les couples sont les données globales qui aident

grandement à choisir des actionneurs ou à valider si les choix sont satisfaisants. Les solutions obtenues peuvent guider le concepteur vers certaines possibilités de démarche plus adaptées à la solution mécanique spécifique.

Il y a plusieurs sections à développer pour pouvoir intégrer tout le processus comme, par exemple, la définition du terrain, la démarche, les trajectoires de pattes, les calculs des efforts et la dynamique. Ceci représente en partie un travail d'intégration puisque des recherches ont porté sur ces différents aspects. Cependant, il est ici question de réunir tous ces éléments afin de créer un outil, soit le LADRMQ, pour améliorer la conception.

2.6 Cahier de charge pour la conception d'un robot marcheur

Le robot de la figure 13 représente le robot Capra, un pré-concept qui servira à l'évaluation du logiciel. Voici donc notre solution préliminaire qui a été imaginée après avoir fait le cahier des charges suivant. Ce robot a comme objectif de marcher à des vitesses 1 m/s à près de 2 m/s et doit transporter une charge supérieure à son poids, soit de 100 kg. Il doit se déplacer dans tous les types d'environnements, urbains ou sauvages.



Figure 13 Capra, robot à 4 pattes, prototype. (ETS)

Ce robot possède huit degrés de liberté actifs [1] [2], en considérant les pattes seulement. La configuration des genoux a été choisie vers l'extérieur, mais nous allons devoir valider ce choix et d'autres considérations comme les longueurs des différentes membrures. Étant donné que ce projet est d'une grande envergure, il faut prendre en considération de fabriquer un prototype créé à partir des résultats d'optimisation de ce logiciel. Le prototype est montré à la figure 14.

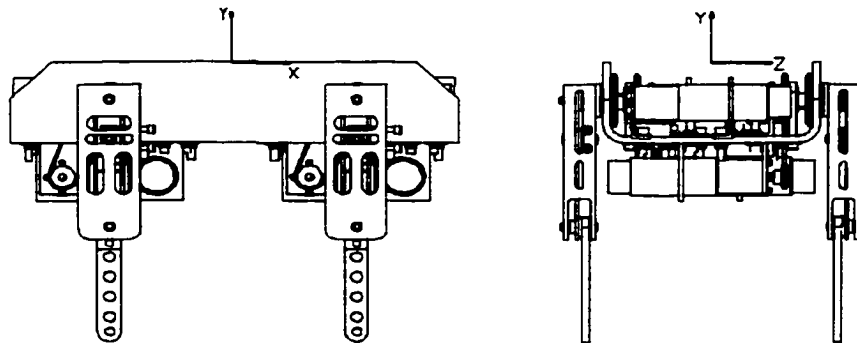


Figure 14 Prototype Haedus.

Le prototype est très semblable au plus gros robot, malgré des petites différences au niveau du transfert de puissance des moteurs aux pattes. Par contre, le modèle mathématique peut être considéré semblable, dans le cas où la membrure de transfert de Capra est considérée comme ayant une masse minime. De toute façon, ce cas se retrouve avec deux robots de taille différente, lesquels nous pourrions comparer, tout en utilisant les proportions et les facteurs de forme comme référence.

Le logiciel qui incorpore ce processus de recherche et de design est composé de plusieurs modules de calculs. Tous ces modules seront décrits et détaillés dans le prochain chapitre.

Vient ensuite la validation de tous les modules de calcul mais aussi des résultats finaux de la démarche. Les résultats seront comparés avec d'autres recherches afin de démontrer l'utilité de ce logiciel. Le logiciel de simulation commercial Working Model sera utilisé afin de vérifier la validité des résultats en considérant certains paramètres qui ont subi des simplifications. Ce logiciel est plus convivial et plus général, mais plus difficile à manipuler pour notre cas particulier.

CHAPITRE 3

MODÉLISATION DES TÂCHES ET DES MÉCANISMES D'UN ROBOT MARCHEUR

3.1 Modèles et hypothèses

L'ensemble des travaux se divise en trois modules distincts. La mécanique est le tout premier module qui sera traité. Le terrain et la démarche suivront de façon détaillée. Chaque module sera décrit de façon globale pour ensuite préciser les différents paramètres et la méthode de calcul utilisée.

3.1.1 La mécanique du robot

Certaines considérations de base ont été appliquées au modèle de la mécanique. Les membrures sont considérées comme rigides. La flexion de celles-ci est considérée comme négligeable. La position du pied en fonction de la position des articulations est toujours connue, puisque les ressorts et l'amortissement ne sont pas utilisés.

Ce qui est modélisé, au niveau de la mécanique, est un robot quadrupède. Les pattes sont limitées à deux d.d.l. Deux configurations différentes des articulations sont modélisées. Chacune des articulations n'a ni friction ni viscosité. Les axes des articulations sont perpendiculaires au mouvement du corps. Le corps se déplace à vitesse constante sur un plan en ligne droite. Le modèle mécanique comporte la modélisation cinématique et dynamique du corps et des pattes de façon séparée.

La cinématique est développée pour chaque patte de façon à les considérer comme des liens en série. L'orientation des liens permet l'utilisation des quatre paramètres de Denavit-Hartenberg [35]. Cette approche a pour effet de considérer temporairement le corps du robot comme un objet fixe dans l'espace. Le modèle n'utilise que deux des paramètres de la méthode car les autres sont fixés dans les deux configurations déjà modélisées. La cinématique reste la même et l'influence de ce choix apparaît dans la dynamique du système. Afin de définir le modèle de la cinématique du robot, il faut connaître la position des liens du robot dans l'espace.

3.1.1.1 Les positions dans l'espace

Tous les liens sont représentés dans l'espace cartésien en fonction de leur centre de masse et du système d'axes de rotation. En réalité, seul le corps et les pieds ont besoin de références cartésiennes. Le but d'avoir tous les liens avec des références cartésiennes est de rendre plus facile l'affichage et la simulation graphique et de connaître la position de chacun dans l'espace. La figure 15 représente tous les référentiels du système qui permettent de définir la cinématique et la dynamique du modèle mécanique.

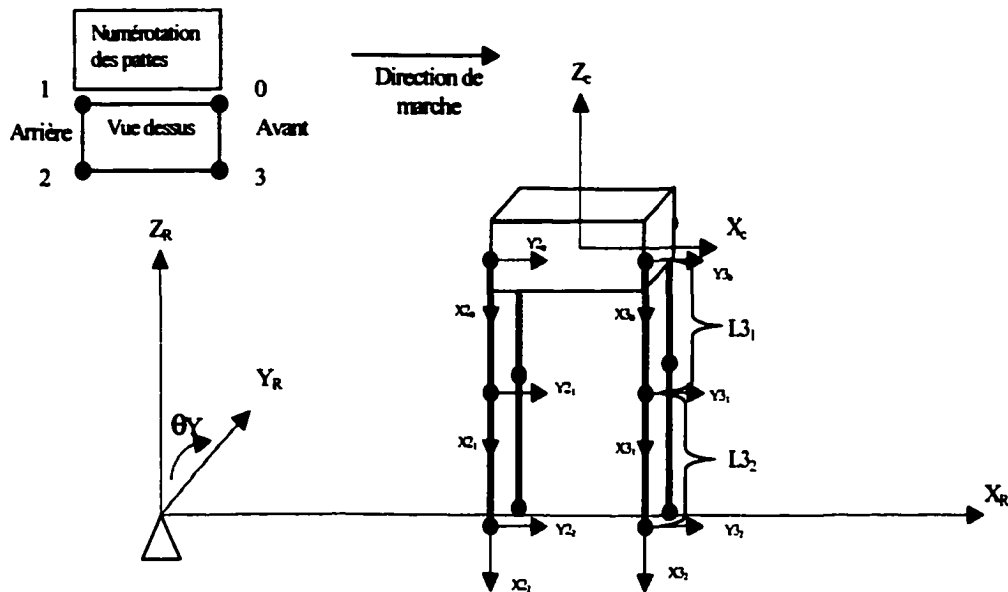


Figure 15 Représentation des référentiels.

En utilisant la méthode de Denavit-Hartenberg [37], plusieurs paramètres ont besoin d'être définis. La méthode décrite pour la cinématique directe utilise quatre paramètres de base, soit l'angle de rotation autour de l'axe (θ), la longueur du lien (l), la distance entre les axes (a) et la torsion entre les axes successifs (t). L'utilisation de ces paramètres et des matrices homogènes permet de représenter une très grande variété de suites d'articulations en série. Le logiciel ne permet pas la modification interactive de la configuration. Pour calculer la dynamique, il faut ajouter quelques autres paramètres comme les masses et la position des centres de masse par rapport aux axes de rotation. Ces différents paramètres sont décrits en détail plus loin.

3.1.1.2 Les longueurs

Les robots modélisés possèdent quatre pattes et ont deux degrés de liberté par pattes. L'utilisation de la cheville fera partie d'une étape future à cette recherche. Les différentes longueurs des liens sont variables. La jambe(l_2) et la cuisse(l_1) décrivent la patte dans son ensemble tandis que le corps est représenté par sa longueur (Longcorps) et sa largeur. Le pied est considéré comme un point ponctuel. Pour les pattes, les dimensions importantes sont les longueurs entre les différents joints ou extrémités. Et pour le corps, les paramètres sont la largeur des hanches et la distance entre les hanches avant et les hanches arrière, comme montré sur la figure 16.

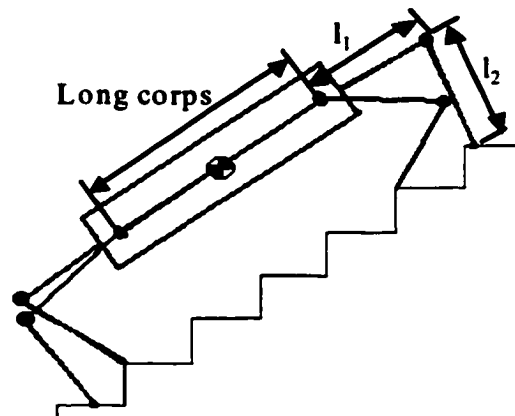


Figure 16 Longueur des liens.

3.1.1.3 Les masses

La masse est définie pour chacun des ensembles ayant un mouvement commun. Chaque patte a, selon le nombre de degrés de liberté donné, une certaine quantité de liens dont il faut déterminer la masse. Dans une vue d'ensemble, il faut considérer deux masses de façon plus particulière, soit la masse du corps et de ses organes et la masse de charge. La masse de la charge permet de déterminer la résistance spécifique de mouvement de charge. S'il n'y a pas de masse de charge, il est aussi impossible d'évaluer la résistance spécifique de type 2 et 4.

Dans plusieurs des recherches[23] déjà réalisées, l'utilisation de l'hypothèse de la patte sans masse est très fréquente. Elle permet de simplifier le problème et de le segmenter en deux. Le mouvement des pattes n'influence donc pas la dynamique du corps. Ceci est surtout vrai quant le

robot est statiquement stable comme dans notre cas. Prenons l'exemple d'un robot bipède. Le but de l'utilisation de cette hypothèse permet de simplifier le modèle du robot à un pendule inversé simple. (figure 17)

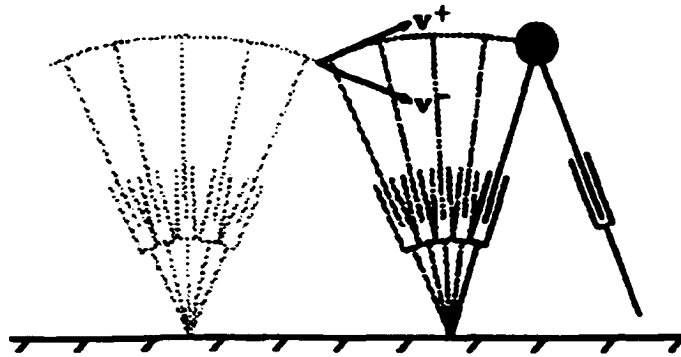


Figure 17 Pendule inversé simple.

Dans cette situation, seule la dynamique du corps est considérée. Selon plusieurs théories [6],[17], l'utilisation des démarches en pendule inversé est économique en énergie et préférable lorsque les vitesses de déplacement ne sont pas trop élevées. Elle utilise en grande partie l'énergie potentielle gravitationnelle accumulée. La vitesse au moment du contact au sol doit correspondre le plus exactement possible à la vitesse du prochain pas afin qu'il y ait conservation du mouvement. Lorsque la vitesse est plus grande qu'une certaine valeur, il est nécessaire de changer de démarche car elle n'est plus aussi efficace. Il existe un moment encore plus limite ou il est possible que les pattes quittent le sol à cause d'une trop grande accélération verticale.

Il est très avantageux de réduire la masse des pattes au maximum. Il est par contre compréhensible que les pattes ne peuvent avoir une masse nulle. C'est pourquoi les tests sont faits, considérant des prototypes ayant des masses de pattes équivalentes à moins de 10 % de la masse du robot. Le prototype Haedus a une patte ayant une masse inférieure à 3% de la masse du robot. La patte qui influence le mouvement du corps est la patte dans les airs car elle doit se déplacer rapidement.

Si les pattes sont trop lourdes, elles vont influencer le mouvement du corps et changer considérablement le centre de gravité de l'ensemble du robot, créant des accélérations qui peuvent

engendrer des difficultés de contrôle supplémentaires. Comme illustré dans la figure 18, l'effet de la masse dans les pattes modifie le CG global du robot.

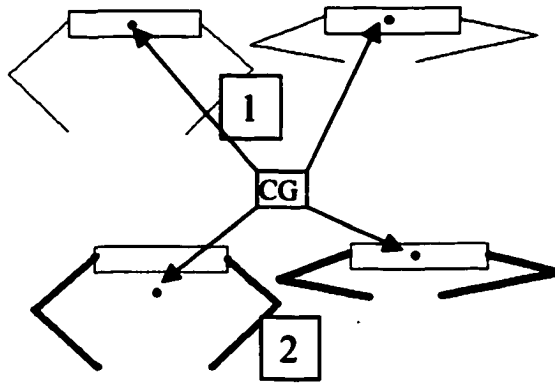


Figure 18 Influence de la masse des jambes sur le centre de masse du robot.

Dans le premier exemple, le déplacement des pattes ne génère pas ou peu de déplacement du centre de gravité du robot, ce qui n'est pas le cas de la deuxième situation. Il est encore plus difficile de contrôler la position du CG si celui-ci n'arrête pas de changer de place. Une autre considération importante provient du fait que, plus les pattes sont lourdes, plus leur inertie est grande et de ce fait, les efforts afin d'engendrer des mouvements rapides seront plus grands. Puisque l'hypothèse de pattes sans masse a été énoncé, le CG devient donc fixe et rend l'analyse de la stabilité plus constante. Il s'agit de considérer dans tous les cas le centre de gravité théorique du robot.

Il est possible d'aller encore plus loin en supposant que la masse des pattes est tellement faible par rapport au corps, que leurs mouvements n'influencent presque pas celui du corps. Il est par contre nécessaire de définir les masses des pattes afin de calculer la dynamique des pattes comme des manipulateurs distincts. Chaque patte a plusieurs liens avec des masses différentes, même si normalement la gauche et la droite sont considérés comme identiques.

Une fonction a été créée afin de permettre de calculer automatiquement la masse des membrures en fonction des contraintes dans les membrures. Il est possible de faire le choix de la forme de la membrure et de déterminer le facteur de sécurité utilisé. La position des masses est importante dans le calcul des inerties et de la dynamique.

3.1.1.4 Les centres de masses et l'inertie

Pour ce qui est des centres de masses, la position est fixée temporairement au centre des liens, comme sur la figure 19. Les inerties sont calculées au centre de masse.

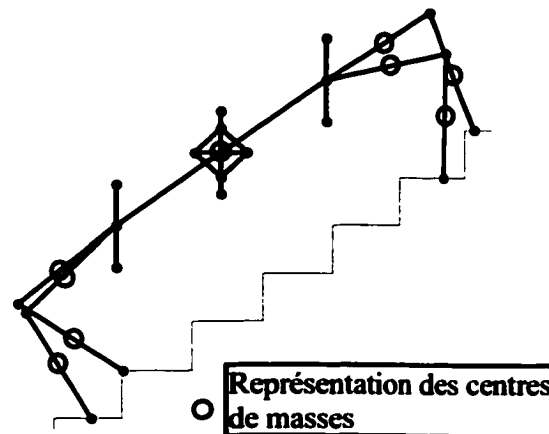


Figure 19 Position des centres de masses.

Il y a une variable décrivant la position du centre de masses sur une droite entre les différents joints et une autre décrivant la masse elle-même.

3.1.2 Topologie du terrain

Le terrain est l'environnement de travail des robots marcheurs. La modélisation du terrain est faite en utilisant des paramètres dimensionnels et aussi des catégories de formes. La figure 20 représente différentes formes de terrains qu'il est possible de définir avec les différents paramètres. En (A), c'est la définition d'un terrain en paliers. Si ces paliers sont définis de façon égale, ça devient un escalier. Le terrain (B) est varié et donc, n'a pas de forme particulière. Le terrain n'est pas nécessairement au même niveau sous les pattes gauches et droites. Le terrain (C) est un terrain plat. Pour obtenir ces différents types de terrains, il faut ajuster une série de paramètres. Les terrains varient seulement en X et Z, car les robots évalués marchent seulement en ligne droite. L'ajout de l'axe Y implique de faire tourner le robot mais aussi de considérer les efforts latéraux qui augmentent de beaucoup la complexité du calcul des efforts de contact sur les pattes.

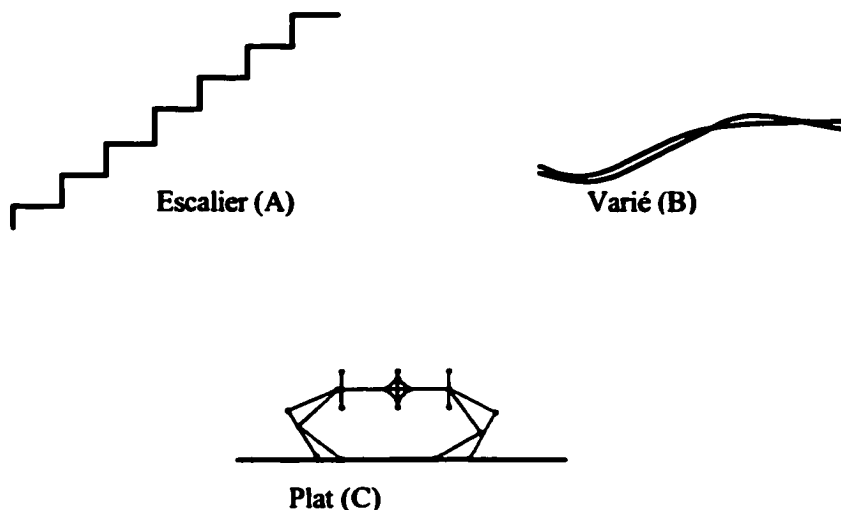


Figure 20 Variété de terrains.

Grâce à la planification de trajectoires, les différents terrains présentés dans la revue de littérature peuvent être considérés plus uniformes. Cette hypothèse permet d'évaluer les trois types de terrains présentés. Un minimum de paramètres permet de les représenter.

Les paramètres sont définis en trois groupes, soit la forme générale, les cavités et les représentations. La forme générale, comme représentée à la figure 21, est définie par la longueur, les dénivelés longitudinaux et latéraux, la variation et l'intervalle de variation.

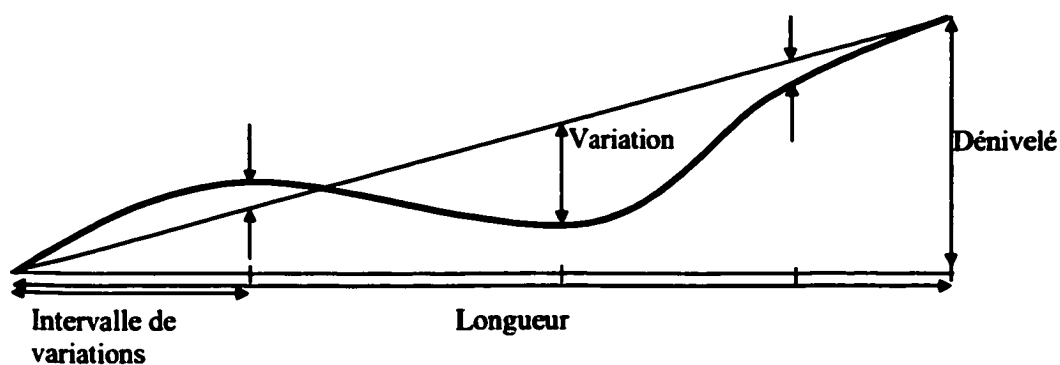


Figure 21 Paramètres de la forme générale.

Les cavités se rajoutent sur la forme générale. Elles sont définies par de plus petites variations qui influencent plus localement la forme du terrain. Elles se trouvent à intervalles réguliers, mais ne sont pas illustrées ici.

Pour les mêmes données de forme générale, l'utilisation des paramètres de représentation modifie l'image du terrain. Par exemple, sur la figure 22, l'utilisation du mode palier modifie la représentation de la figure 21 de façon radicale.

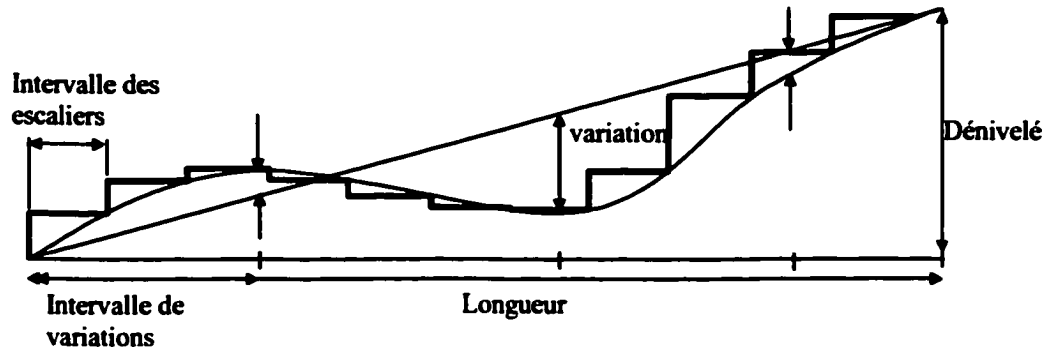


Figure 22 Paliers et escaliers.

Ce paramètre permet de créer des étages à intervalle de distance régulière. Cette technique permet de définir des escaliers standards ou irréguliers. Dans cette représentation, la longueur des marches est définie par un paramètre, mais la hauteur dépend de la tendance de la variation générale du terrain, qui est construit grâce à l'utilisation des courbes cubiques. Une courbe est définie pour chaque côté des pattes à une largeur correspondante à la largeur des pattes. La figure 23 montre l'effet de la variation de hauteur entre les deux lignes de terrain sur la position plus ou moins repliée des pattes.

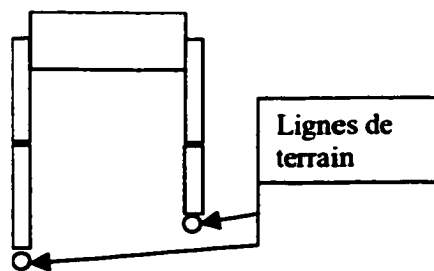


Figure 23 Vue frontale du robot et du terrain.

Comme les robots sont testés sur un plan, il est nécessaire de définir seulement deux lignes de terrain. La variation latérale doit être limitée pour ne pas excéder les limites physiques du robot. Pour ce faire, la pente latérale est limitée à la même valeur demandée pour le dénivelé global du terrain.

3.1.3 La démarche

La démarche est le moyen utilisé par les êtres vivants pour se déplacer. Elle comporte un agencement de séquences. Ces séquences correspondent au dépôt et au transfert de pas. La démarche est composée des mouvements de pattes qui se répètent périodiquement ou non périodiquement. La séquence est dite périodique lorsque chaque patte a un cycle de dépôt et de levée qui est régulier dans le temps. Par exemple, pour l'utilisation de l'entre-pas, la patte 0 se dépose toujours au temps zéro dans le cycle. Pour cela, il faut savoir en tout temps la position exacte du prochain dépôt de pattes.

Lorsque des pattes sont déposées plus rapidement, parce qu'il y a une bosse sur le terrain, il faut ajuster la séquence pour modifier la démarche. Comme ce logiciel contient le modèle du terrain, il n'est pas nécessaire de valider en temps réel les changements causés par des irrégularités. Le terrain est défini et connu. Nous avons donc toutes les données nécessaires pour bien poser les pieds dans une séquence périodique. La démarche comporte dans notre cas trois parties de calculs distincts, soit la séquence de dépôt et de retrait des pattes, la trajectoire des pattes dans les airs et la trajectoire du corps du robot. La démarche proprement dite considère seulement la séquence des pas et non leur position, mais cela influence la trajectoire des pattes.

3.1.3.1 La séquence de démarche

La séquence périodique est paramétrée afin de tester différentes conditions de marche. La séquence de la démarche dépend surtout du rapport de rendement (RR) qui représente la proportion du temps de cycle où la patte est en contact avec le sol. Les démarches qui sont considérées comme lorsque l'on marche ont un RR de plus de 0,5. Mais ce n'est pas suffisant comme définition. Il faut aussi connaître la séquence de dépôt des pattes. Il faut également considérer un autre paramètre, soit le décalage des cycles de chacune des pattes face aux autres pattes. Chaque décalage peut représenter différents types de démarches. En voici quelques-unes représentées à la figure 24. Les chiffres représentent l'instant dans le cycle où la patte vient en contact avec le sol. Le cycle complet des quatre pattes correspond à un.

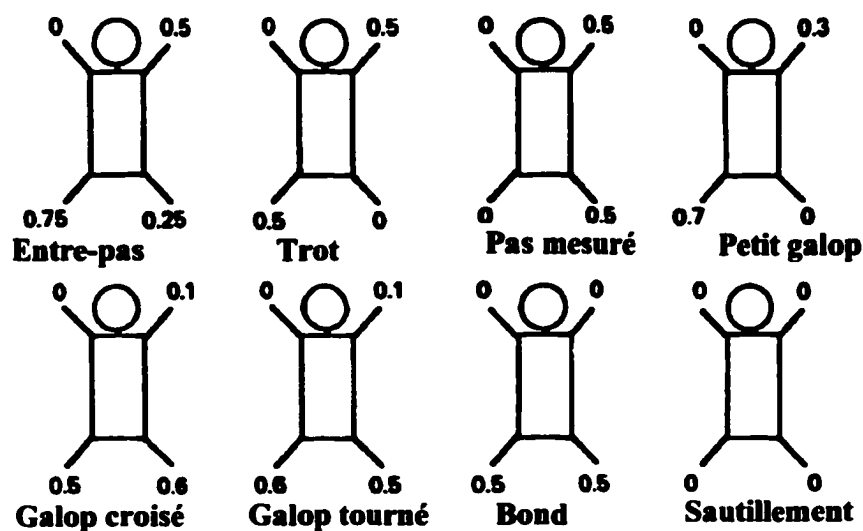


Figure 24 Différentes séquences de marche et de course. [65]

La première ligne d'image représente des marches tandis que la deuxième représente des courses ou des joggings. La figure 25 montre une autre façon de représenter les démarches qui sont de type marche.

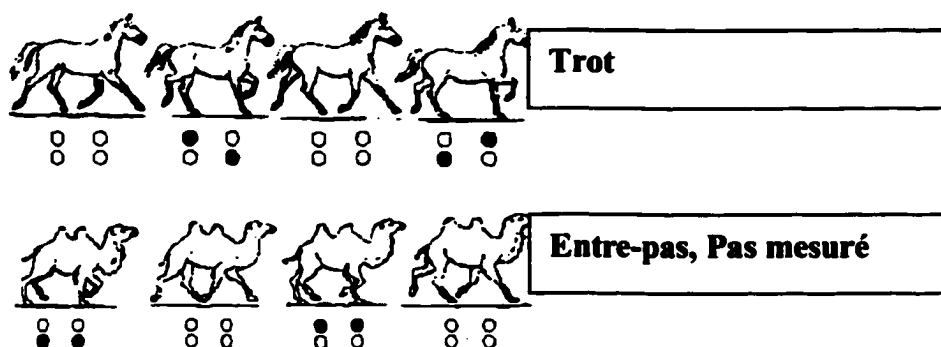


Figure 25 Représentation par dépôt des pattes.

Il est possible de représenter tous ces types de démarches avec les différents paramètres présents dans le logiciel, mais ces types de démarche ne sont pas tous statiques et ne sont donc pas implantés dans ce logiciel. La marche de type "dandinement" est la démarche qui a été étudiée. La séquence des pattes est représentée dans le logiciel sous la forme d'un graphique de séquences, qui est décrit à la figure 26.

Elle indique quand chaque patte est dans les airs. Elle représente aussi le cycle complet de quatre pattes et où se situent les pattes au sol par rapport à la longueur du pas. Le temps au sol est à angle pour montrer la variation de position en fonction de l'échelle de l'axe des Y qui varie entre 0 et 1 (i à i+1). La variation est proportionnelle au déplacement de la patte, le 0 étant le dépôt de la patte et le un étant le moment où la patte doit quitter le sol.

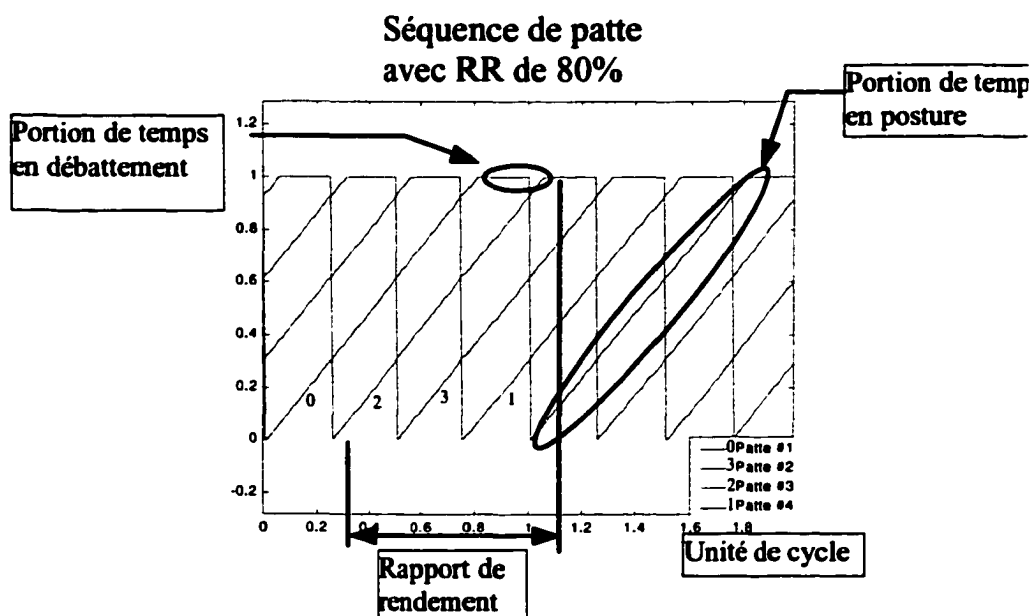


Figure 26 Graphique de séquence.

Il est montré sur la figure 26 deux cycles complets des quatre pattes qui passent de la posture au débattement. Cette figure représente une possibilité parmi une multitude. Le RR. est de 80%, donc sur un 5% du temps de cycle, les quatre pattes sont au sol en même temps, comme on peut le voir sur l'agrandissement à la figure 27.

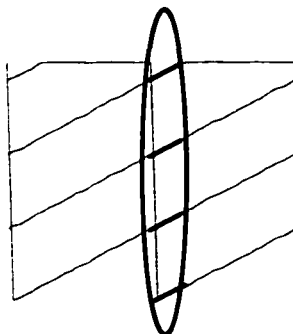


Figure 27 Portion de temps du cycle où les quatre pattes sont au sol.

Par exemple ce petit 5% du cycle permet un transfert plus stable des pattes et aide à conserver un meilleur équilibre tout en augmentant la marge de stabilité (MS). La marge de stabilité est la distance entre le point d'équilibre et les limites du polygone de support. Le choix de 5% est arbitraire afin de montrer la différence au niveau de la séquence.

La figure 28 montre les marges de stabilité et le polygone de support. Si seulement trois pattes sont au sol, le polygone de support est un triangle avec une de ses faces très proche du centre de gravité. Ceci réduit de beaucoup la marge de stabilité lors du transfert de poids d'un triangle de support à un autre.

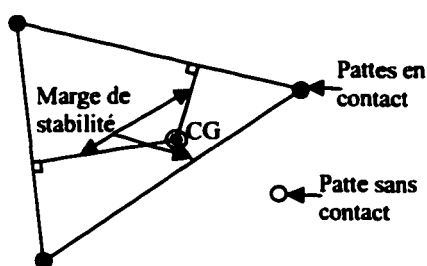
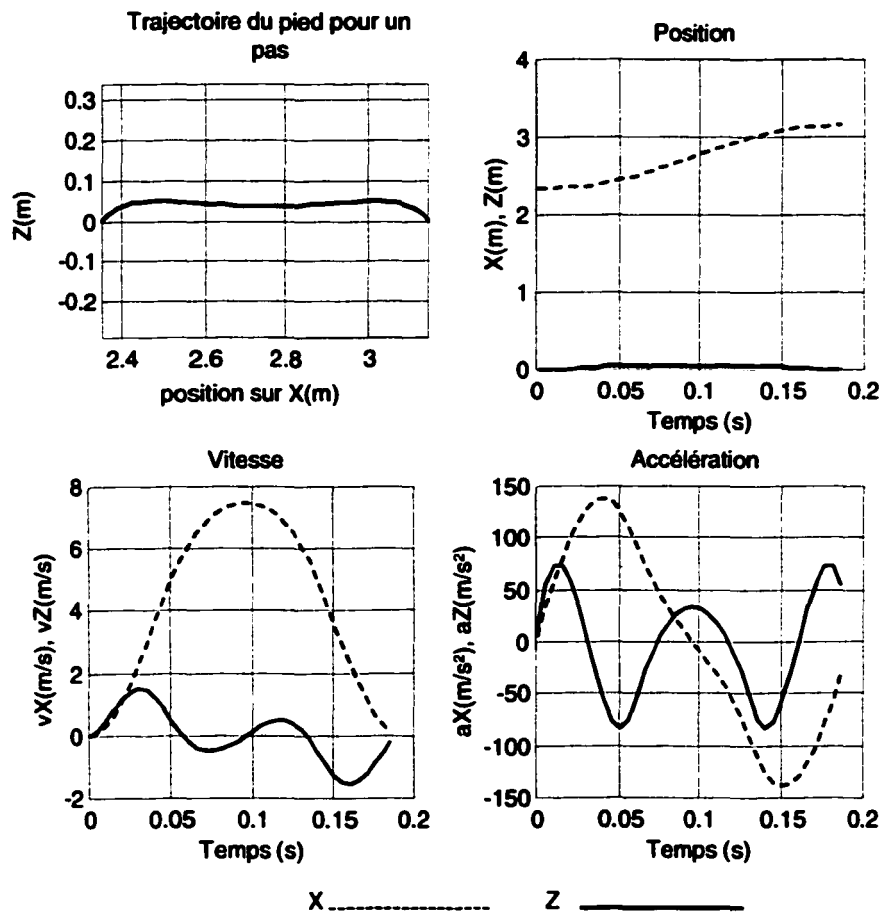


Figure 28 Marge de stabilité.

Lorsque le RR est de 75%, le transfert se fait lorsque le centre de gravité est sur une des diagonales du polygone de support. Si le RR. est plus grand que 75%, le transfert se fait avec une plus grande MS puisque le transfert se fait lorsque les quatre pattes sont au sol.

3.1.3.2 Trajectoire des pattes

Ayant défini le cycle de chaque patte au niveau des transitions, il faut maintenant introduire les paramètres qui vont décrire la trajectoire que ces pattes vont effectuer durant le cycle. Le pas comporte deux informations qui influencent la position du corps, soit la vitesse et la longueur. Ces deux informations décrivent la portion de temps où la patte est au sol. Dans les airs, la hauteur du pas, la forme, les accélérations, la hauteur du corps et les vitesses maximales sont les paramètres qui influencent la trajectoire.



Graphique 1 Trajectoire d'une patte dans les airs.

La trajectoire de chacune des pattes est construite à partir du point de départ et d'arrivée du pied au sol, de la vitesse du corps et du temps de cycle. Les trajectoires sont formées par résolution de

polynômes de degré cinq afin d'imposer la continuité en position, en vitesse et en accélération [34] aux points de dépôt et de retrait des pattes au sol. Pour ce qui est des autres points de contrôle, la tangence et la vitesse de transfert sont les paramètres de forme. La forme de la trajectoire influence certains éléments de la démarche. Toutes les coordonnées utilisées dans la création de la trajectoire sont définies dans le repère global du terrain. Et pour déterminer la position des pattes dans le repère global du terrain, il faut connaître la position du corps afin de déterminer la position des joints des pattes.

3.1.3.3 Trajectoire du corps

Le corps, comme les pattes, doit suivre une certaine trajectoire. La trajectoire est en fonction de la hauteur du corps et de la forme du terrain. Si les pattes de gauche et de droite sont à différentes hauteurs, comme le montre la figure 29, la moyenne des hauteurs de pattes est considérée. Ceci permet de garder le corps à une hauteur moyenne et diminue les risques de contrainte irréalisable au niveau des pattes.

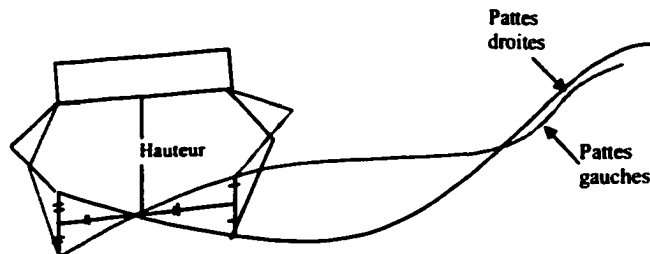


Figure 29 Posture du corps.

Ensuite, c'est la moyenne des hauteurs des pattes avant et arrière qui est utilisée pour définir la hauteur du corps. Une trajectoire uniforme est formée en fonction de la forme générale du terrain, ceci sans considérer les irrégularités.

La longueur des pas est constante si on regarde un plan horizontal et ainsi, varie de façon globale lorsque le terrain a une dénivellation changeante. Puisque la longueur de pas réel change, le temps en contact change aussi et cela influence directement le temps où les pattes ne sont pas en contact. Toutes les proportions de temps sont directement fonction de la vitesse du corps. La

vitesse du corps est constante sur toute la trajectoire. Le terrain étant quelconque, le corps accélère verticalement.

3.2 Développement des modules de calcul et explications

La section 3.1 présente les différents modules en donnant des explications globales. Dans la présente section, les formulations mathématiques utilisées pour chaque module sont développées.

3.2.1 Cinématique et dynamique du robot

La cinématique est faite pour chaque patte et selon la posture choisie. Des fonctions de cinématique directes et inverses sont faites à l'aide de la méthode de Denavit-Hartenberg (Paul) [35]. Cette méthode montre comment placer les systèmes d'axes sur chaque joint afin de représenter adéquatement tous les mouvements de chaque joint.

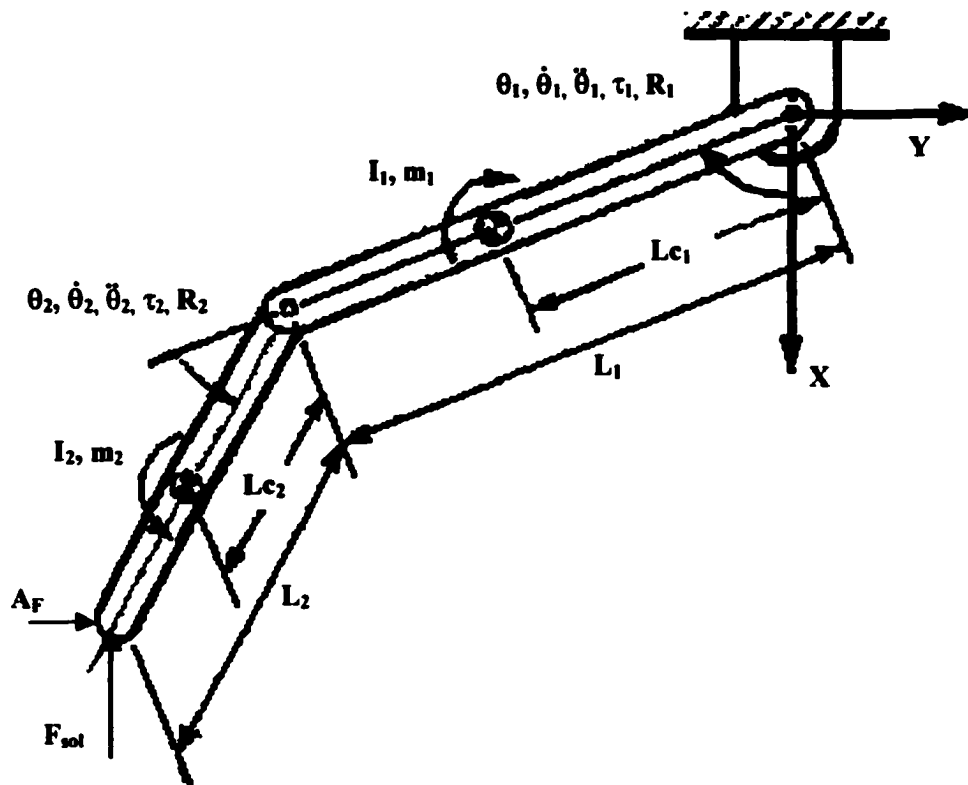


Figure 30 Représentation de la modélisation d'une patte (Asada H, et Slotine).

Les indices de chacun des éléments, se retrouvant dans les équations qui vont suivre, représentent le numéro du joint, tel qu'illustré à la figure 30. Dans la figure 30, la patte est liée au sol mais dans le cas du robot, elle est liée au corps. Les références restent par contre les mêmes. Les équations qui suivent sont développés en utilisant la méthode du lagrangien [35].

$$H_{11}=M_1*L_{c1}^2+I_1+M_2*(L_1^2+L_{c2}^2+2*L_1*L_{c2}*cos(\theta_2))+I_2 \quad (3.1)$$

$$H_{22}=M_2*L_{c2}^2+I_2 \quad (3.2)$$

$$H_{12}=M_2*L_1*L_{c2}*cos(\theta_2)+ M_2*L_{c2}^2+I_2 \quad (3.3)$$

$$h = M_2*L_1*L_{c2}*sin(\theta_2) \quad (3.4)$$

$$G_1= M_1*L_{c1}*g*sin(\theta_1)+ M_2*g*(L_{c2}*sin(\theta_1+\theta_2)+ L_1*sin(\theta_1)) \quad (3.5)$$

$$G_2= M_2* L_{c2}*g*sin(\theta_1+\theta_2) \quad (3.6)$$

$$\tau_1= F_{sol}*(-L_1*sin(\theta_1)-L_2*sin(\theta_1+\theta_2))- A_F*(L_1*cos(\theta_1)+L_2*cos(\theta_1+\theta_2)) \quad (3.7)$$

$$\tau_2= F_{sol}*(-L_2*sin(\theta_1+\theta_2))- A_F*(L_2*cos(\theta_1+\theta_2)) \quad (3.8)$$

$$R_1= H_{11}\ddot{\theta}_1 + H_{12}\ddot{\theta}_2 - h\dot{\theta}_2^2 - 2h\dot{\theta}_1\dot{\theta}_2 + G_1 + \tau_1 \quad (3.9)$$

$$R_2= H_{22}\ddot{\theta}_2 + H_{12}\ddot{\theta}_1 - h\dot{\theta}_1^2 + G_2 + \tau_2 \quad (3.10)$$

M_i : composantes de masse des liens du joint i à $i+1$

θ_i : composante de position angulaire du lien i

$\dot{\theta}_i$: composante de vitesse du lien i

$\ddot{\theta}_i$: composante d'accélération du lien i

G_i : composantes gravitationnelles qui influencent le couple au joint

H_{ij} : composantes des influences inertielles sur les liens

τ_i : composantes des couples de réaction des forces de contact sur le lien i

R_i : somme des couples au joint i

Ces équations permettent de connaître les couples nécessaires afin de faire suivre les pieds le long des trajectoires définies. Cette information est cruciale pour déterminer les paramètres d'optimisation. Les couples permettent de calculer la puissance mécanique et la résistance spécifique. À partir de la puissance mécanique et de la connaissance des constantes des moteurs électriques utilisés, la puissance électrique peut être calculée.

La position des pattes au sol permet aussi de calculer l'effort qu'elles doivent réaliser afin de garder le corps à une même hauteur. Comme les tests qui sont prévus le seront selon des

conditions de marche statiquement stables, le calcul des efforts de contact peut-être résolu de façon statique. Même en considérant cette éventualité, le problème ne se résout pas facilement.

3.2.1.1 Force de contact des pattes au sol

La force de contact est la force de réaction qui agit sur les pattes en contact avec le sol. Dans le cas des forces de réaction, il n'est pas question de considérer le problème en deux dimensions car, même si le robot ne bouge que sur le plan, il peut tomber dans toutes les directions. Il existe des études comme celle de Zhou [44] qui démontrent des méthodes de calcul des forces de réactions. Les conditions générales de calcul utilisées ici sont les suivantes: la somme des moments est égale à zéro et la somme des forces est aussi égale à zéro. Nous avons donc les deux équations suivantes:

$$\Sigma F=0 \quad (3.11)$$

$$\Sigma M=0 \quad (3.12)$$

Il est ainsi possible de décrire cinq équations qui représentent les efforts de contact. La somme des forces en Y n'est pas utilisée dû au fait que le robot est planaire. Il reste que le problème a un minimum de six inconnues et il faut donc poser des contraintes. La somme des forces en Y est toujours valide mais ne sert à rien dans la résolution, puisqu' aucun vecteur de contrainte n'agit sur les pattes dans cette direction. Une représentation graphique permettra de mieux voir les composantes décrivant les différentes équations. La figure 31 nous montre le plan longitudinal du robot, soit le plan XZ, et aussi le moment autour de l'axe Y. La figure 32 montre, pour sa part, le plan latéral et le reste des éléments qui influencent les différentes équations.

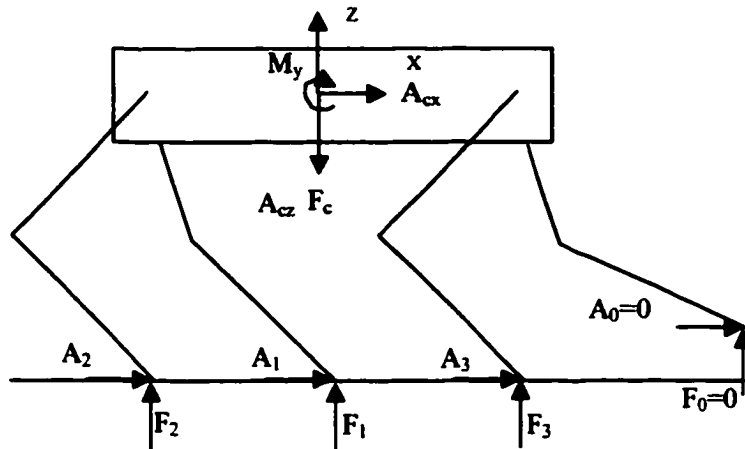


Figure 31 Vue du plan XZ et des forces en action.

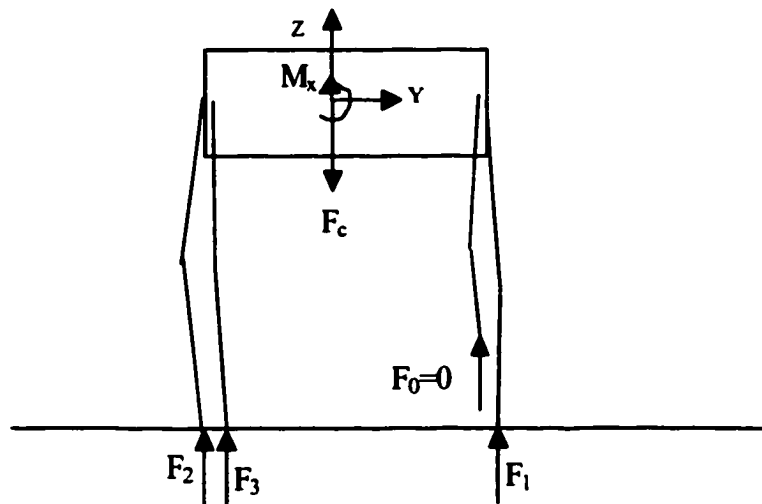


Figure 32 Vue du plan YZ et des forces en action.

$$\Sigma F_x = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 - A_{Cx} = 0 \quad (3.13)$$

$$\Sigma F_z = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 - F_c - A_{Cz} = 0 \quad (3.14)$$

$$\Sigma M_x = F_1 y_1 + F_2 y_2 + F_3 y_3 + F_4 y_4 = 0 \quad (3.15)$$

$$\Sigma M_y = F_1 x_1 + F_2 x_2 + F_3 x_3 + F_4 x_4 - A_1 h_1 - A_2 h_2 - A_3 h_3 - A_4 h_4 = 0 \quad (3.16)$$

$$\Sigma M_z = A_1 y_1 + A_2 y_2 + A_3 y_3 + A_4 y_4 = 0 \quad (3.17)$$

F_c : correspond à la force gravitationnelle qui s'exerce sur le corps du robot

A_c : correspond à la force d'accélération du corps

- F_i : correspond aux forces de réaction du sol face à la force gravitationnelle qui s'exerce sur le corps du robot
- A_i : correspond aux forces de réaction qui s'exercent sur les pattes afin de générer l'accélération sur le corps
- x_i : correspond aux positions des pattes en fonction de l'axe x et la référence qui est le CG du corps
- y_i : correspond aux positions des pattes en fonction de l'axe y et la référence qui est le CG du corps
- z_i : correspond aux positions des pattes en fonction de l'axe z et la référence qui est le CG du corps

Les dimensions x , y et h sont des dimensions signées, donc pouvant être négatives si elles représentent une position dans le cadran négatif du plan cartésien. Les équations sont générales et représentent toutes les conditions, que ce soit trois pattes au sol ou quatre. La résolution des équations doit se faire en considérant chaque état particulier. Il est possible de regrouper certains états, comme par exemple lorsque trois pattes sont au sol ou encore lorsque deux pattes sont au sol. Les états qui seront utiles pour la marche statique le sont lorsqu'il y a trois pattes au sol et lorsqu'il y a quatre pattes au sol. Il y a par contre quatre états où il y a trois pattes au sol. La situation qui est représentée à la figure 31 et figure 32 est l'état où trois pattes sont en contact avec le sol et que la patte 0 n'est pas en contact. La simplification est la même pour les différents états, seulement la variable de référence change. Dans le cas des figures précédentes, puisque la patte 0 n'est pas en contact, son influence sur le reste du système n'est pas considérée. Malgré le fait d'éliminer une patte de la solution, il reste tout de même six variables et cinq équations. Il est donc nécessaire de contraindre le système d'équations afin de permettre la résolution. La condition pour contraindre le système est représentée à la figure 33. Dans le plan XY, on voit bien l'effet de l'équation de la somme des forces en X. La contrainte imposée est la suivante: du côté où il y a deux forces, ces deux forces sont égales. Dans le cas de la figure 33, les forces A_2 et A_3 sont égales. Ceci permet d'uniformiser les efforts pour créer l'accélération du corps. Cette considération est une première approche au problème. Il est possible qu'elle engendre des discontinuités.

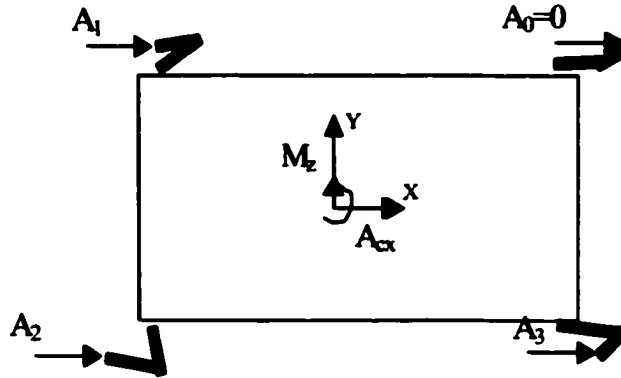


Figure 33 Vu de dessus plan XY.

La résolution du système d'équation se fait par substitution. Par le remplacement de A_2 dans les équations précédente, on obtient:

$$A_1 = 0 \quad (3.18)$$

$$F_1 = 0 \quad (3.19)$$

$$A_2 = A_3 \quad (3.20)$$

$$\Sigma F_x = 2 A_3 + A_4 - A_{Cx} = 0 \quad (3.21)$$

$$\Sigma F_z = F_2 + F_3 + F_4 - F_C - A_{Cz} = 0 \quad (3.22)$$

$$\Sigma M_x = F_2 y_2 + F_3 y_3 + F_4 y_4 = 0 \quad (3.23)$$

$$\Sigma M_y = F_2 x_2 + F_3 x_3 + F_4 x_4 - A_3 (h_3 + h_2) - A_4 h_4 = 0 \quad (3.24)$$

$$\Sigma M_z = A_3 (y_3 + y_2) + A_4 y_4 = 0 \quad (3.25)$$

En utilisant les équations 3.19 et 3.23, il est possible d'isoler les termes en A_3 pour ensuite simplifier et résoudre le terme en A_4 . En faisant ces opérations, on obtient alors:

$$A_3 = (A_4 - A_C)/2 \quad (3.26)$$

$$A_3 = A_4 y_4 / (y_3 + y_2) \quad (3.27)$$

À partir des équations 3.24 et 3.25, il est ensuite possible de réécrire:

$$(A_4 - A_{Cx})/2 = A_4 y_4 / (y_3 + y_2) \quad (3.28)$$

Et isoler pour déterminer la valeur de A_4 :

$$A_4 = - \frac{A_{cx}}{\left(\frac{2y_4 - (y_3 + y_2)}{(y_3 + y_2)} \right)} \quad (3.29)$$

En utilisant A_4 (éq 3.27), il reste A_3 qui est calculée par l'éq. 3.25, puis A_2 par l'éq. 3.18. Cette démarche est faite pour chaque état où trois pattes sont au sol. Pour ce qui des forces de réaction selon l'axe Z, les équations sont un peu plus compliquées et sont développées en annexe 1. Le cas des quatre pattes au sol n'est pas discuté car la charge est distribué également sur quatre pattes et donc, ce cas n'est pas un cas critique qui nécessite une analyse approfondie.

3.2.2 Forme du terrain et sa construction

Les variables qui permettent de décrire le terrain dans toutes ces particularités ont été vues précédemment. Il faut maintenant définir les équations qui constitueront le modèle. La technique de base utilisée est de représenter le terrain à l'aide de courbes cubiques. Dans des conditions encore plus générales, le terrain serait en forme de grille. Comme on peut le voir à la figure 34, le terrain est constitué de deux courbes séparées à distance égale du CG, à la largeur des hanches. Dans cette figure, les deux courbes sont identiques en dimension.

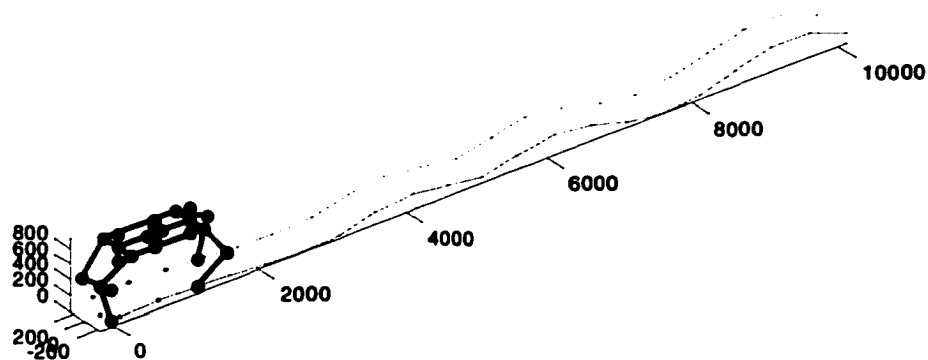


Figure 34 Terrain varié montré en vue isométrique (unité mm).

Il est aussi possible d'avoir une courbe différente pour les pattes d'un même côté si on considère, par exemple, que les pattes arrière sont plus rapprochées. Les courbes sont définies avec les

paramètres de base. La dénivellation est définie sur la base de la variation du terrain, sur une distance de 10 m. Ensuite, il faut définir la longueur du terrain, puisqu'il est inutile d'avoir un terrain de 20 km si le robot ne fait que quelques pas. Cette variable est donnée en mètre. La figure 35 représente un terrain qui ressemble à un plan incliné à angles variables, ce qui dans l'ensemble, ne représente pas beaucoup de terrains différents, mais qui est la base de la définition.

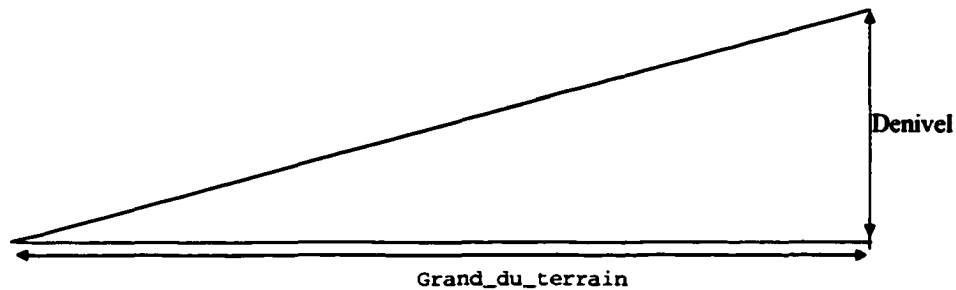


Figure 35 Variable de dénivelé et de grandeur de terrain.

Exemple : Denivel = 3(m/10m)

Grand_du_terrain = 10

Dans l'exemple précédent, la dénivellation est déterminée par l'utilisateur, mais dans le cas d'escaliers, le dénivelé est calculé en fonction de la hauteur et de la longueur des marches.

$$\text{denivel} = \frac{\text{haut_marche}}{\text{prof_marche}} * 10 \quad (3.30)$$

Comme la variable de dénivelé est en m/10m, il faut faire la multiplication du facteur de dénivelé par dix.

Par la suite, il faut superposer des variations de terrain qui sont aléatoires, donc pouvant être différentes d'une patte à l'autre. Ces variations sont appliquées à une certaine distance qui est définie par la variable Seg_form_general. La variation générale est définie dans un intervalle de variation particulier.

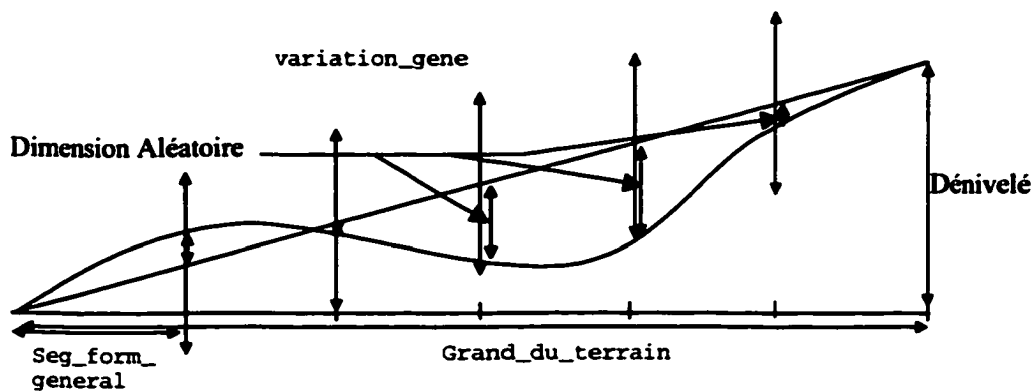


Figure 36 Variation générale du terrain.

La figure nous démontre que pour un terrain d'une longueur de 10 m et une segmentation du terrain à tous les 1.66 m, un nombre aléatoire compris à l'intérieur de la zone de «variation_gene» est défini et il permet de créer une courbe aléatoire uniforme. Les variables aléatoires sont différentes d'un côté à l'autre, permettant ainsi d'avoir des terrains variés selon les directions longitudinales et transversales au mouvement.

Ces mêmes courbes peuvent avoir deux représentations différentes si l'option d'escalier est utilisée. La figure 37 montre justement la figure 36 avec comme différence que l'option d'escalier est utilisée.

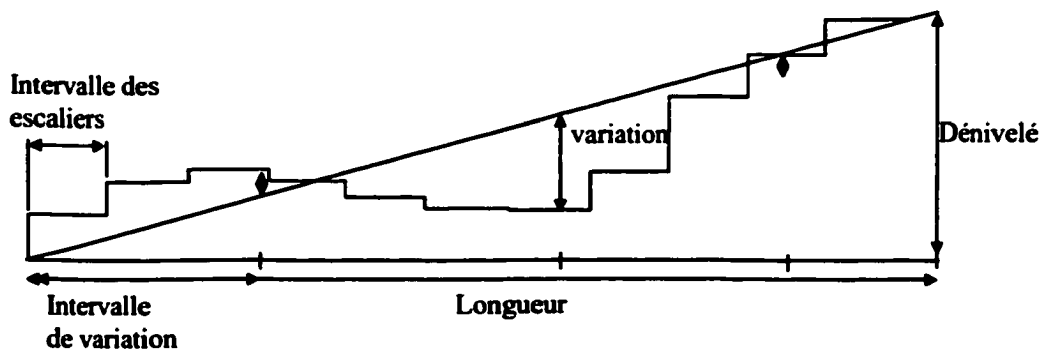


Figure 37 Option d'escalier utilisé.

La courbe est remplacée par des paliers de même longueur qui sont à des hauteurs différentes. La hauteur de la marche dépend de l'intersection entre la courbe et l'intervalle des paliers.

Comme il a été mentionné dans la description des paramètres, il existe une variable qui détermine le dénivelé latéral maximum. Le but de cette variable est de limiter la différence qui peut se produire par l'utilisation de données aléatoires. Par exemple, si le côté gauche obtient la valeur maximum aléatoire et que le côté droit obtient le minimum, le résultat de ce terrain est montré à la figure 38. Cette figure montre que la patte de gauche est très basse et que la patte de droite est très haute, ce qui donne une configuration de marche qui est presque impossible mais surtout peu probable.

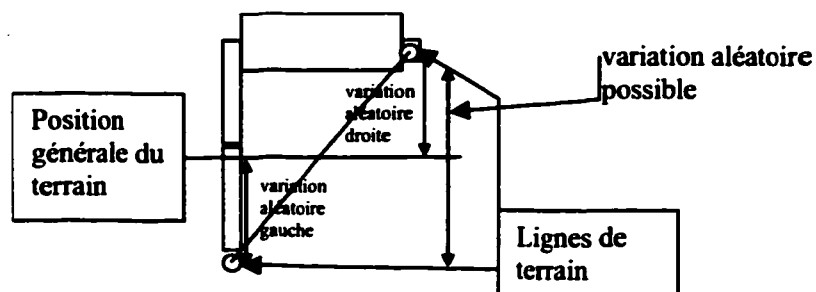


Figure 38 Limitation du dénivelé latéral.

Si la variation générale est trop grande et que pour une même coordonnée X, les limites opposées sont atteintes, alors il y a des risques que le robot soit incapable de traverser ce terrain. La méthode utilisée pour contrer cette problématique est de limiter la différence entre les deux côtés à l'équivalent du dénivelé longitudinal.

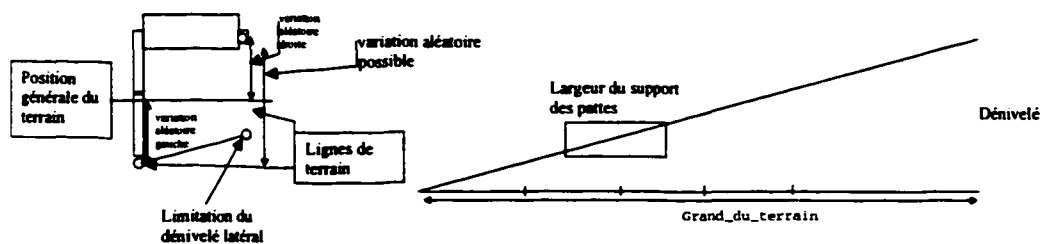


Figure 39 Influence de la limite du dénivelé latéral.

Le calcul de la différence maximum entre les côtés se fait comme suit:

$$\text{denivel_lat} = \text{denivel} / \text{Grand_du_terrain} \quad (3.31)$$

Donc, cette équation décrit que la pente latérale maximum sera la même que la pente générale du terrain. Et de ce fait, la différence entre les deux côtés sera:

$$\text{max_denivel_lat} = \text{larg_corp} * \text{denivel_lat} \quad (3.32)$$

La largeur du corps multiplié par la pente donne la différence de hauteur maximum possible. Si cette valeur est dépassée, les données aléatoires sont corrigées afin de les respecter. Le terrain étant précisé, il reste à modéliser la démarche qui permettra de le traverser.

3.2.3 Structure et définition de la démarche

Les paramètres permettent de définir toutes les démarches que les quadrupèdes sont capables de réaliser telles que présentées à la section 3.1.3. Certaines démarches sont déjà définies à l'avance. Le dandinement est défini de plusieurs façons.

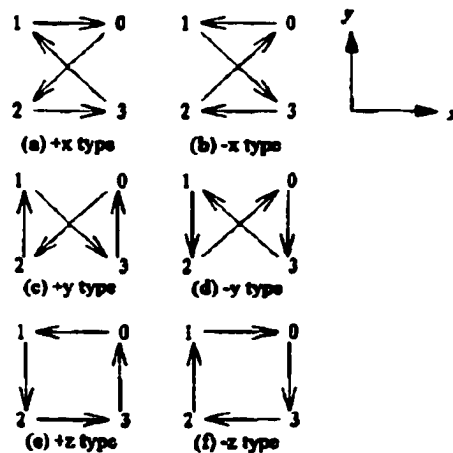


Figure 40 Différentes séquences de dandinement [43].

Le dandinement est une démarche qui sépare la levée de chaque patte du quart de la séquence totale. Comme montré à la figure 3.26, il y a plusieurs séquences possibles pour cette seule démarche. Cette figure représente l'ordre de levée de chaque patte. Tous ces dandinements sont modélisés dans le logiciel. La démarche la plus utilisée pour la marche en ligne droite est la +X comme précisé par Hirose [41]. Une matrice de séquence contient toutes les informations sur un cycle complet de marche. Un cycle complet de marche est composé d'un cycle de chacune des pattes. Chaque patte devra donc se lever et se déposer une fois dans le cycle complet de marche.

Les figure 41 et 42 représentent la numération des pattes et des joints qui sont utilisés dans les calculs en général.

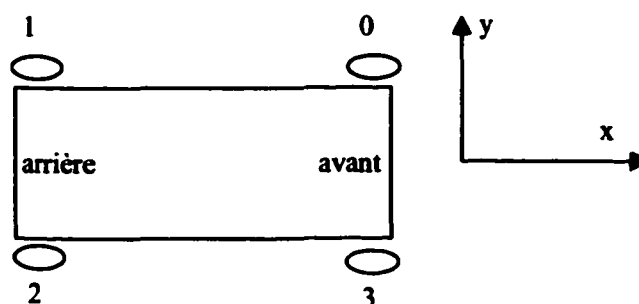


Figure 41 Numérotation des pattes vue de dessus.

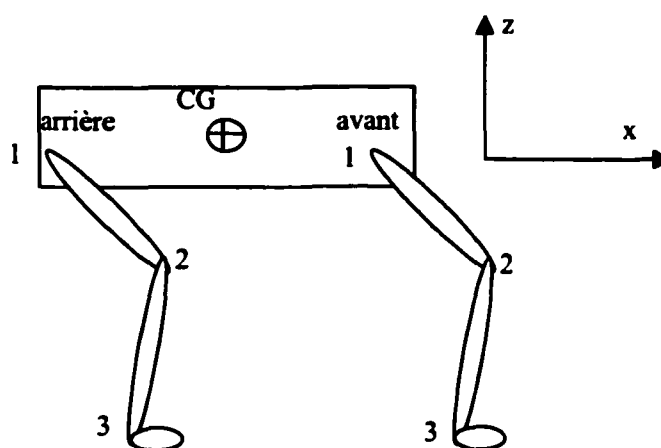


Figure 42 Numérotation des joints (vue de côté).

La numérotation des pattes se fait dans le sens anti-horaire en commençant par la patte avant gauche. Cette numérotation permet de combiner plus facilement les pattes avant et les pattes arrières. En ce qui concerne la numérotation des joints, la référence est le corps et elle commence à la base. À la figure 42, les hanches de chaque patte commencent à un et ainsi de suite jusqu'au pied si, dans le futur on considère l'intégration de plus de deux axes par patte. Les données sont structurées afin de regrouper les résultats et de faire les calculs de façons matricielles.

Les étapes pour structurer cette matrice de séquence sont les suivantes, en prenant comme exemple le dandinement en X. La démarche en +X se représente de la façon suivante lorsque la RR égale 75%.

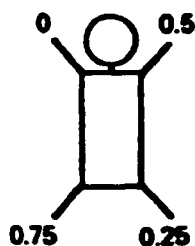


Figure 43 Séquence des pattes d'une démarche en +X.

L'image montre que la patte zéro se dépose au temps 0 dans un cycle complet de valeur 100%. La patte deux suit en se déposant à l'instant 0,25 et ainsi de suite pour les autres pattes. Le RR influence l'instant de levée de chacune des pattes. Par exemple, si le RR est de 75%, la levée est synchronisée avec le dépôt de la patte suivante. La patte zéro se dépose et en même temps la patte deux se lève. Lorsqu'on veut représenter à la fois le dépôt et la levée de chaque patte, il est possible d'indiquer les deux chiffres.

Le premier chiffre représente l'instant dans le cycle où la patte doit quitter le sol et le deuxième chiffre représente l'instant, comme précédemment, du dépôt de la patte au sol. La figure 44 démontre un RR de 80%. La problématique du traitement des informations est que les données sont dans un certain désordre. Une façon de résoudre ce problème est de réordonner les données dans une matrice. La matrice résultante, après ordonnancement, ressemble à ceci:

$$\text{var_Temps} = \begin{bmatrix} 0 & 5 & 25 & 30 & 50 & 55 & 75 & 80 \\ 0 & 2 & 2 & 3 & 3 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

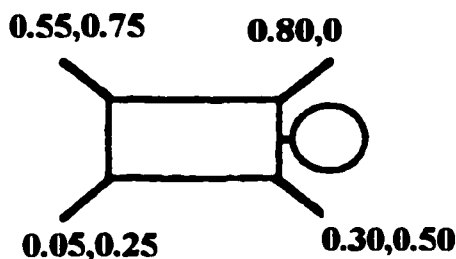


Figure 44 Dépôt et levée de patte selon la séquence.

Ici, la première ligne de la matrice représente les instants de changement d'état dans un cycle qui dure cent unités. La deuxième ligne est l'identification de la patte qui réalise le changement

d'état. Et l'action est décrite sur la dernière ligne, le 0 étant le dépôt de la patte tandis que le 1 décrit l'action de lever la patte. Il devient simple par la suite d'évoluer dans le cycle et de changer l'état des pattes dans les conditions décrites dans la matrice.

Maintenant que la séquence de la levée et de dépôt a été déterminées, il faut décrire les conditions intermédiaires : la trajectoire du pied dans les airs et où le pied devra être déposé. Le plus simple est de connaître la prochaine position de dépôt, connaissant le terrain. La méthode pour déterminer la position du dépôt de la prochaine patte commence par la connaissance de la position du corps dans l'espace à l'instant du changement d'état de la patte en question. Puisque la vitesse du corps est constante, il est facile de déterminer la position du corps sur l'axe x en fonction du cycle complet de marche par l'équation suivante:

$$XC_i = XC_{i-1} + \text{longpas} \left(\frac{\text{var_Temps}(1, j)}{75} \right) \quad (3.34)$$

XC_i : est la position du corps de l'état à calculer selon les coordonnées x du terrain
 XC_{i-1} : est la position du corps de l'état précédent selon les coordonnées x du terrain
var_Temps : est la matrice de séquence définie plus haut.
longpas : est la longueur de support au sol par rapport au corps
i : est l'indice du point d'état qui est en train d'être calculé
j : est l'indice de la colonne de la matrice var_Temps qui correspond à l'état présent

À partir de la position XC_i du corps, il est ensuite possible de calculer la position de dépôt de la patte. La formule qui calcule cette donnée dépend de l'orientation du corps dans l'espace afin de connaître la position des hanches par rapport au CG du corps. Par exemple, la hanche avant se définit comme suit:

$$XH_{av_i} = \text{penteXC} \left(\frac{\text{longcorps}}{2} \right) \quad (3.35)$$

XH_{av_i} : est la position en x de la hanche avant par rapport au CG du corps

penteXC : est la composante de l'orientation du corps en x

longcorps : est la variable qui décrit la longueur du corps

Le dividende 2 revient à dire que le CG du corps est dans le centre géométrique du corps, donc à égale distance entre les hanches avant et arrière. La position de la patte, lors du dépôt, par rapport

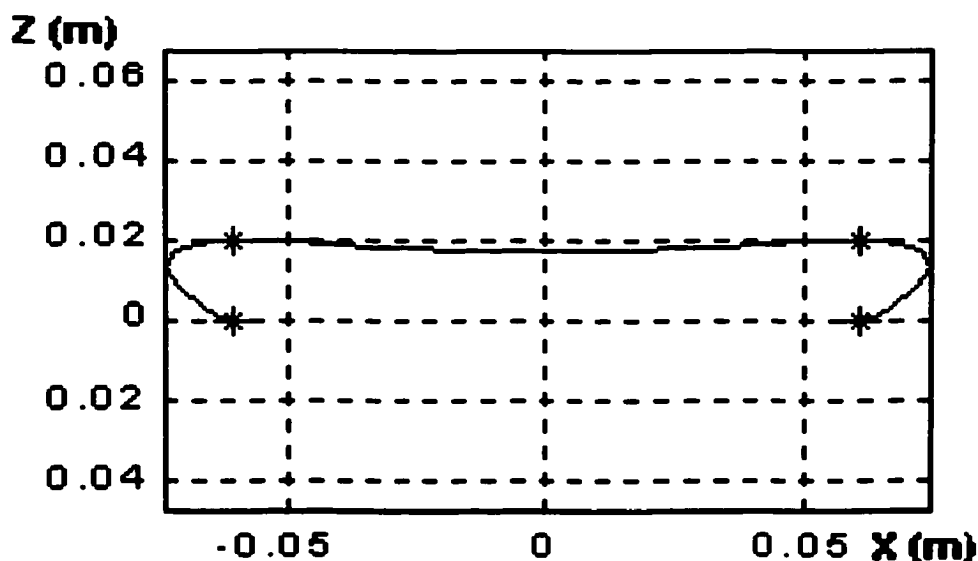
à la hanche, est de façon standard, définie à la moitié de la longueur du pas vers l'avant. Ensuite se rajoute le décalage de la patte par rapport à la référence de la hanche.

$$XP_i = XH_{av_i} + \left(\frac{\text{longpas}}{2}\right) + \text{decal}(1) \quad (3.36)$$

XP_{1i} : est la position en x du pied de la patte #un par rapport au CG du corps

$\text{decal}(1)$: est le décalage entre le centre du pas et la hanche

Chaque patte est définie de la même façon en considérant les pattes qui sont à l'avant et celles à l'arrière. Il reste à déterminer la trajectoire de la patte, pour les instants de temps où la patte perd le contact du sol. Ceci est fait avec des courbes paramétriques de 5^e ordre, dans le plan des x, des y et des z. L'utilisation du y permettra dans les travaux future de générer la rotation du corps. Ceci permet d'avoir plus de flexibilité et de contrôle sur la forme et les données de mouvement. Le graphique 2 représente une trajectoire de patte avec les points de changement d'état et deux autres points de contrôle qui influencent la forme de la trajectoire.



Graphique 2 Trajectoire et les points de contrôle.

Cette trajectoire montre l'utilisation des courbes paramétriques de 5^e ordre. Cette courbe est composée de trois segments et quatre points de contrôle qui sont définis dans le plan x-z. Les

paramètres qui sont fixés sont la position des points de contrôle, les accélérations en début et fin de trajectoire et les vitesses à chaque point de contrôle. Les informations de la trajectoire sont définies par rapport aux coordonnées globales cartésiennes du terrain. Au moment de quitter le sol, la vitesse du pied est égale à zéro. Ce faisant, la planification de la trajectoire de la patte ne génère pas de choc. La même chose se produit à l'instant du dépôt de la patte au sol. Le calcul des six coefficients se fait par l'inversion de matrice. Les équations suivantes décrivent les relations de position, vitesse et accélération pour chaque segment de la courbe.

$$\theta(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 + a_4 t^4 + a_5 t^5 \quad (3.37)$$

$$\dot{\theta}(t) = a_1 + 2a_2 t + 3a_3 t^2 + 4a_4 t^3 + 5a_5 t^4 \quad (3.38)$$

$$\ddot{\theta}(t) = 2a_2 + 6a_3 t + 12a_4 t^2 + 20a_5 t^3 \quad (3.39)$$

La matrice qui permet la résolution des coefficients à la dimension carrée équivalente à six fois le nombre de segments (fonction en Annexe 2). Le nombre de segment correspond à la forme et le nombre de point contrôle utilisé. Avec cette matrice il est possible de modéliser ces trajectoires en fonction du temps de cycle. La forme et la hauteur de la courbe sont d'autres paramètres qui influencent les coefficients des équations.

3.3 Méthode d'utilisation des modules

3.3.1 Choix des paramètres variables

Le logiciel contient près de 150 paramètres permettant de faire les calculs des différents modules. Certains de ces paramètres sont utiles pour la mise en forme de l'affichage et des résultats. Alors, il y a des variables qui sont plus pertinentes que d'autres pour faire l'évaluation du design et qui permettent de l'améliorer. Toutes les variables qui décrivent la structure mécanique sont d'un grand intérêt, car ce sont les paramètres dimensionnels qu'on désire améliorer. Les paramètres variables principalement utilisés sont énumérés dans un ordre préliminaire sans but particulier: le facteur de rendement, la hauteur du pas, la masse du corps et de la charge, la configuration des genoux, la vitesse du corps, la longueur du pas, la longueur du corps, la largeur du corps, la hauteur du corps par rapport au sol et la longueur de la membrure #1 de chaque patte. Chaque variable a plus ou moins d'influence sur le système, et c'est un sujet qui sera vu en détail dans le prochain chapitre. Pour l'instant, il est important d'expliquer la méthode d'optimisation utilisée.

3.3.2 Séquence de calcul et optimisation

L'optimisation se fait par l'application d'un plan d'expérimentation. Donc, plusieurs tests sont réalisés avec différentes données afin de trouver une solution valide et satisfaisante. Comme il y a plusieurs paramètres qui sont reliés, il est important de définir une séquence de calcul. La réponse finale sera représentative des limites des variables qui auront été choisies. C'est une séquence d'appel de sous-fonction qui calcule différentes informations.

Tableau I

Séquence de calcul

Définition des paramètres et dimension des variables
Calcul des contraintes
Masse et inertie
Séquence de démarche
Le terrain
Optimisation
Mouvement du corps
Calcul des états de changement de pas
Calcul des positions intermédiaires
Calcul de la position des pattes sans contacts
Calcul des données et résultats pour l'analyse
Vitesse
Accélération
Couple
Puissance
Résistance spécifique
Mémorisation des données
Affichage des résultats(graphique ou fichier)

L'optimisation se fait à partir du moment où le terrain est défini. Ce qu'il faut comprendre, c'est que pour un terrain en particulier, une solution est calculée. Il est possible de modifier les

paramètres de démarche sans rien changer au terrain. A chaque fois que le logiciel est exécuté, le terrain est défini aléatoirement. Tout les tests d'optimisation selon le plan d'expérience seront faits en fonction de ce terrain particulier.

La séquence est importante étant donné que certaines données sont relatives au mouvement du corps, alors que d'autres interviennent seulement dans le choix de la position des pattes au sol. Tout ceci a pour but d'augmenter la rapidité de calcul.

Une série de variables est utilisée présentement pour faire l'optimisation, mais il est possible de toutes les utiliser. La structure d'utilisation des différentes variables est de déterminer une valeur minimum, un écart et une valeur maximum. Le plan d'expérience fait évoluer chaque variable les unes après les autres afin de tester la panoplie de possibilités dans les limites de chaque variable. Les variables d'optimisation sont regroupées selon la séquence de calcul comme présenté au tableau I. Les premières variables d'optimisation influencent la démarche du robot et donc, font varier l'ensemble des données. Il faut mentionner alors le type de démarche, le RR et le décalage de séquence.

Par la suite, la séquence de calcul traite le mouvement du corps dans l'espace. Il est ainsi nécessaire de déterminer les variables qui influencent directement la position du corps. Par exemple, la largeur et la longueur du corps influencent la position des hanches par rapport au sol et ceci change la posture du corps. La hauteur moyenne de marche détermine la distance entre le sol et l'axe de la hanche. Cette variable devrait avoir une grande influence sur la puissance nécessaire pour le mouvement. Par les différents tests, il sera possible de valider cette hypothèse. Une autre variable importante sur la position du corps est la longueur des pas.

L'optimisation qui suit a une influence directe sur la trajectoire de la patte dans la portion sans contact. Les paramètres de hauteur du pas et de longueur de la cuisse modifie directement les mouvements aux joints. Ils influencent les couples et les vitesses de chaque joint. Il reste des paramètres qui influencent le calcul de couple et des vitesses mais qui n'influencent rien d'autre. Dans ce cas, il est question des masses, de la vitesse du corps et de la configuration des pattes, en considérant les hypothèses énoncées.

La fonction d'optimisation a pour but de réduire le facteur appelé la résistance spécifique. Ce facteur représente la résistance que le méthode de déplacement doit combattre afin de se déplacer.

Comme préalablement vu dans la littérature, on utilise quatre types de résistances spécifiques (ϵ) qui sont faites pour comparer des types de véhicule entre eux (tableau II).

Tableau II
Résistances spécifiques et les différents types

poids Energie	Total robot + charge	Net charge seulement
Total	ϵ type 1	ϵ type 2
Nette utile au mouvement	ϵ type 3	ϵ type 4

Nous utiliserons le type 4 ou 3, puisque nous connaissons la dépense énergétique nécessaire pour le mouvement, mais pas les besoins pour l'électronique, les systèmes de navigation et de repérage. Le type 4 considère seulement la masse transportée, donc la charge utile de transport. Le type 3 sera utilisé afin de comparer nos résultats avec d'autres recherches, car la charge est souvent considérée comme ou incorporée à l'ensemble. Avec ce facteur, il sera possible de trouver une meilleure solution que celle proposée initialement. Cependant, pour ce faire, il faut s'assurer de la validité des équations utilisées, ce qui sera fait à l'instant.

3.4 Validation des modèles

Ici, il est discuté de la validité des résultats calculés par les différents modules. Une première validation des calculs concernant les efforts et la dynamique et une seconde validation des résultats globaux. La cinématique ne sera pas validée car elle est très bien connue.

Tous les calculs qui sont réalisés par ce logiciel sont faits avec les fonctions de calcul de Matlab. Les représentations graphiques sont réalisées avec les fonctions graphiques de Matlab. Working Model est un logiciel de simulation qui permettra de comparer les résultats afin de les valider. L'utilisation de Working Model s'est faite sous deux formes différentes. La première étant l'utilisation de la version 2D pour faire la validation de la dynamique, puisque la première étape était de modéliser une patte à deux degrés de liberté. La deuxième utilisation est celle de Working model 3D afin de valider, non seulement les forces nécessaires au déplacement, mais

aussi la démarche, l'équilibre et les hypothèses de simplification. Working model 3D est un outil de simulation qui considère la dynamique de tous les éléments en relation dans un environnement. Il considère aussi le contact et la friction, qui sont simplifiés dans le modèle utilisé dans cette recherche. Dans les deux cas, l'entrée de WM sera la position articulaire dans le temps. Il sera donc possible d'identifier l'erreur due aux choix de certaines hypothèses. Le calcul des forces qui s'appliquent aux points de contact est une hypothèse qui doit aussi être vérifiée. Par contre, ce logiciel ne permet pas facilement de faire la simulation et l'optimisation de façon simultanée.

3.4.1 Dynamique d'une patte

Le premier point à vérifier est la dynamique de deux différents modèles de pattes. La première patte pour laquelle la dynamique sera validée est une patte à deux degrés de liberté dont les moteurs sont au niveau des joints.

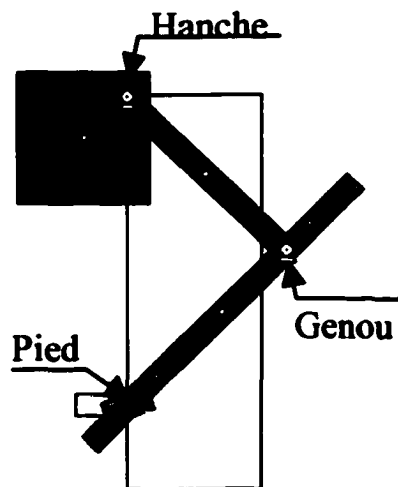


Figure 45 Patte avec lien en série.

La patte de la figure 45 possède deux moteurs et un joint passif au niveau du pied. Tous les liens sont rigides. Les moteurs sont montés directement sur l'axe. Donc, les couples aux moteurs sont calculés directement avec la transposée du jacobien.

$$\bar{\tau} = J'F \quad (3.40)$$

Cette équation représente les couples en fonction de la contrainte au pied et de la position du pied par rapport au corps. Par le même principe, il est possible de décrire un deuxième mécanisme de patte à deux degrés de liberté, mais utilisant un mécanisme de transmission pour contrôler le genou.

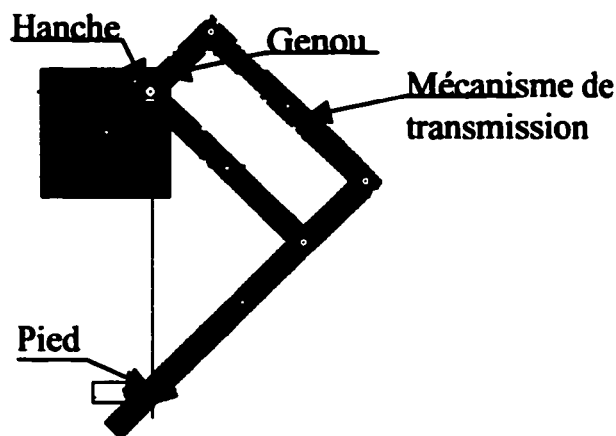


Figure 46 Patte à quatre membrures.

Dans cet autre cas (figure 46), les deux moteurs de la patte se situent au niveau de la hanche et la rotation du genou dépend du mécanisme de transfert. Les références de rotation ne sont plus les mêmes, puisque le moteur du genou ne tourne plus en fonction de la cuisse, mais plutôt en fonction du corps.

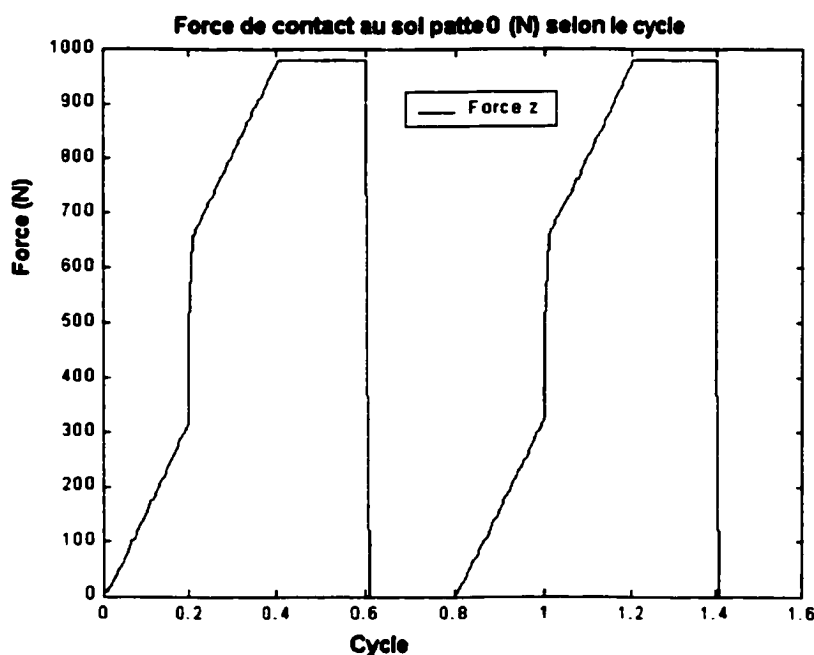
La modélisation des deux pattes précédentes a été faite dans Working Model et dans le logiciel d'aide au design. Ceci a permis de comparer les résultats des deux logiciels et de voir la marge d'erreur des modèles de simulation. Working Model utilise une résolution numérique tandis que le modèle de cette thèse n'en utilise pas.

La première validation se fait dans un état statique afin de comparer les forces de contact du pied au sol. Dans cette situation, les résultats obtenus sont identiques avec une variation de 0.03 %. Les équations de base concernant le calcul des forces transmises aux articulations sont donc comparables.

Lorsque les masses des liens des pattes sont considérées négligeables, il ne reste que la force de réaction qui agit en bout de pattes et fait effet sur les différents joints. Une erreur de 0.03% est

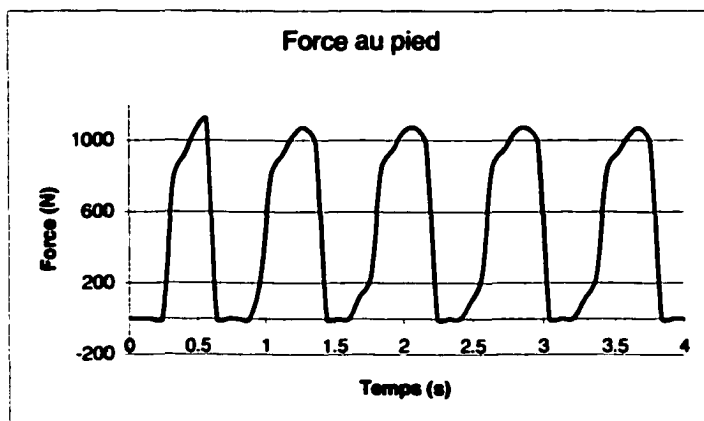
faible et il est possible de considérer les deux modèles de calcul similaire. Ceci valide que les efforts transmis au point de contact sont bien répartis sur la structure mécanique et que les couples, pour garder le système statique, sont aussi valides. Il faut ensuite valider la dynamique de mouvement, qui nécessite de faire bouger le robot.

Les efforts transmis à la patte par le sol varient en fonction de la démarche et de la séquence des pas. Comme le montre le graphique 3, la méthode de calcul engendre des discontinuités à chaque changement de pattes. Cette discontinuité est irréaliste, mais il est possible de démontrer que son influence est mineure sur l'ensemble du système.



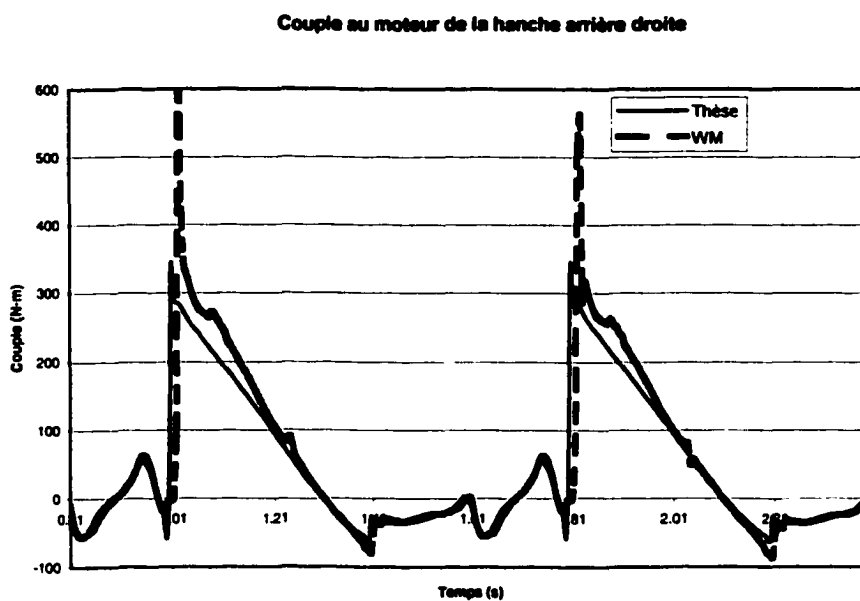
Graphique 3 Cycle des forces de contact au sol.

Le graphique 4 montre les forces de contact calculées par Working Model en considérant les mêmes conditions de fonctionnement. La forme générale est conservée, mais la courbe est lissée. Comme le couple au joint est la dernière donnée calculée dans le processus, la discontinuité n'a pas d'influence sur d'autres résultats.



Graphique 4 Force de contact par Workshop Model.

Le graphique 5, pour sa part représente le comparatif des couples au moteur calculés par Working Model (WM) et ceux définis dans cette thèse. Les calculs ne considèrent pas les instants ponctuels où les pattes viennent en contact avec le sol dans le cas de WM. Ce faisant, il est certain que les données à ces instants précis peuvent être erronées. L'erreur est grande, soit près de 100% au moment du contact, mais pour le reste de la courbe, l'erreur est faible.

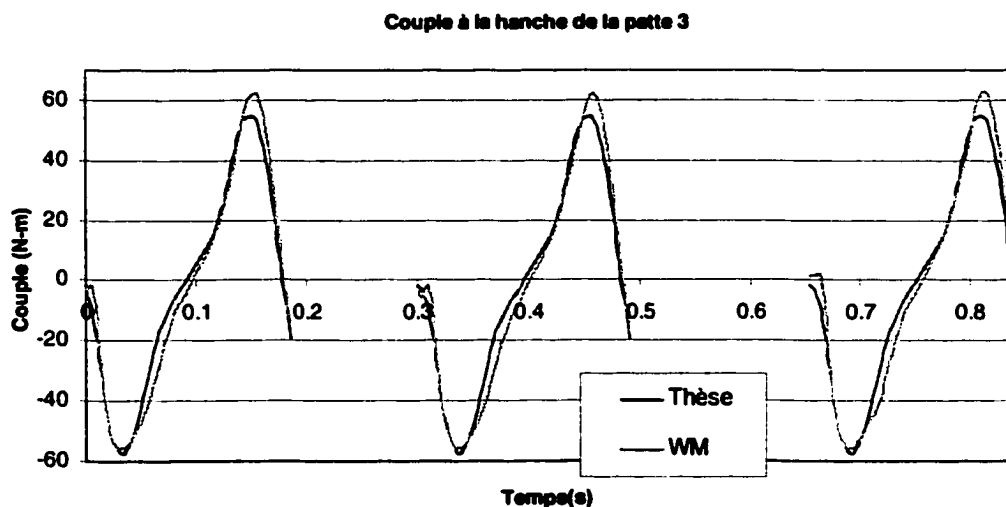


Graphique 5 Comparaison du couple à la hanche en fonction du temps.

Les deux simulations sont faites avec un pas de calcul constant de 0.005 sec. La variation extrême au moment du contact avec le sol n'est présente que pendant 0.005 sec. Il est important de mentionner que le pas d'intégration de calcul standard de Working Model est de 0.01 sec et que, dans ces conditions, la courbe n'a pas de pointe extrême.

Les résultats comportent plusieurs informations. La position du corps et son orientation, des points de contact des pattes, la position des articulations, tous ces paramètres sont des coordonnées généralisées du système.

Les données doivent être analysées localement et avec discernement, étant donné que graphiquement, les courbes sont très similaires. Lorsqu'il est question des chiffres, c'est une autre histoire puisqu'à l'instant où la patte est en débattement (graphique 6), les valeurs sont tellement petites que les erreurs semblent énormes. Par contre, la tangente de la courbe est semblable et il y a un décalage temporel. Le décalage qui est visible sur le graphique est le résultat de l'influence du déplacement du corps sur la patte en mouvement.



Graphique 6 Comparaison des couples dans la phase de débattement.

L'erreur aux points d'inflexion est au maximum de 5 (N) ce qui fait une erreur de $5/55 = 9\%$. Il faut ajouter qu'en proportion des valeurs maximum qui sont de 320 (N), dans ce cas de simulation (graphique 5), l'erreur de 5 (N) n'influence qu'à 1% l'ensemble.

Les courbes sont similaires mais elles ne sont pas identiques. Plusieurs paramètres influencent les différences remarquées, le pas de calcul, le contact avec le sol, l'inertie du corps sur les pattes en débattement et la comparaison du calcul numérique et paramétrique. La variation est, dans l'ensemble, acceptable.

Maintenant que la structure du logiciel est expliquée, il est possible de l'utiliser afin de démontrer son utilité. L'utilisation de ce logiciel est présentée au chapitre suivant.

CHAPITRE 4

APPLICATION DU 'LOGICIEL D'AIDE AU DESIGN DE ROBOT MARCHEUR QUADRUPÈDE' (LADRMQ) SUR LE PROTOTYPE CAPRA

4.1 Démarche d'utilisation

Il est tout d'abord important de connaître les robots marcheurs et le logiciel Matlab pour utiliser ce logiciel, car il n'y a pas encore d'interface utilisateur qui en simplifie l'utilisation et la compréhension. Ensuite, il est important de connaître les informations que le logiciel donne en fait de résultats (annexe 3). Il est question des paramètres de la simulation et des résultats de calculs comme les vitesses, les accélérations, les couples d'une seule patte. Ces valeurs sont données en valeurs moyennes et maximums. Des informations plus globales suivent avec la puissance et la résistance spécifique. Dans le cas particulier de l'étude de Capra, le choix de l'hydraulique comme source d'énergie nous a amené à faire des calculs plus spécifiques comme la cylindrée, le débit et la pression.

La résistance spécifique qui a été expliquée aux chapitres 2 et 4 nous sert de paramètre de comparaison entre deux résultats pour déterminer quel est le meilleur des deux. Ce paramètre regroupe trois informations, soit la puissance mécanique moyenne, la masse et la vitesse. La résistance spécifique représente l'effort pour transporter une masse à une certaine vitesse. Ce qui est beaucoup plus représentatif que la puissance seule. Il est important de faire ressortir les paramètres qui influencent plus directement la résistance spécifique. Avant tout, il faut déterminer les objectifs de conception.

La méthodologie de travail nous a démontré que les aides au design sont utiles dans une portion du processus de la conception. Cette portion est récursive et comprend le calcul et l'évaluation. Pour permettre la validation et la comparaison des résultats, il est nécessaire de faire des tests sur un des prototypes qui a été décrit partiellement dans les chapitres précédents. Il est important, dans tout design, de commencer par définir les objectifs, ou la mise en situation et le cahier de charges. Le cahier de charges complet se retrouve en annexe 4, mais les informations importantes dans l'utilisation du 'LADRMQ' sont les items suivants:

La vitesse de déplacement du robot lorsqu'il marche est comprise entre 0 et 1m/s.

La charge maximum à déplacer est de 100kg .

La charge minimum est de 15kg.

Le poids estimé du robot est de 75kg.

La longueur des pattes, afin d'enjamber les obstacles qui se trouvent dans les environnements humains, est de 1m à 1,2m.

Voici une illustration (figure 47) préliminaire du robot Capra. Des essais avec LADRMQ seront faits afin de déterminer les paramètres dimensionnels qui permettront d'améliorer les performances du robot.

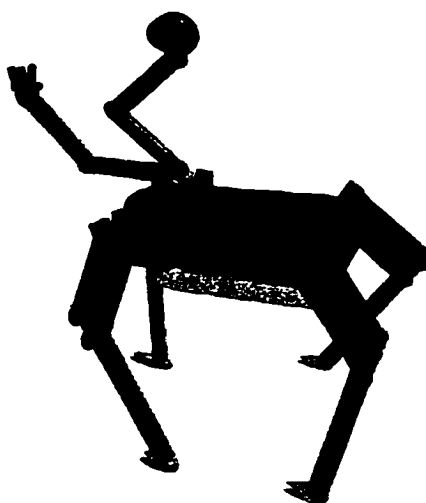


Figure 47 Capra

Ce robot possède quatre pattes avec trois degrés de liberté par patte. Le troisième degré de liberté ne sera pas utilisé, car les déplacements qui seront testés se font tous en ligne droite et ne nécessitent pas de compensation latérale. Il est certain que dans des situations particulières, le changement de la largeur des pattes pourrait être nécessaire, mais ce changement n'est pas un sujet qui sera traité dans cette première étude.

Une série de tests sur les variables de base est faite pour trouver une meilleure solution en considérant l'état fixe des autres variables. Toutes les données d'optimisation seront utilisées séparément afin de comprendre l'influence de chaque variable sur l'ensemble du mouvement et de

la dépense énergétique. Chaque test sera suivi d'un tableau récapitulatif de l'influence de la variable. L'ordre des tests correspond à l'ordre des variables déjà établi dans le chapitre précédent. Comme vu précédemment (4.3.2), la séquence de calcul débute par la définition du cycle du pas. La première variable utilisée est le rapport de rendement. Les autres variables utilisées sont énumérées dans le tableau III. Seuls la configuration des pattes et le type de démarche ne changent pas. Un plan d'expérience complet a été effectué et près de 75 000 évaluations ont été réalisés mais seule l'approche préliminaire par variable est présentée ici.

La solution présentée à la figure 47 représente ce que nous définirons comme le concept initial. Comme il s'agit d'améliorer le concept initial, il serait bien de le décrire plus en détail. La longueur des pattes est la même pour les quatre pattes (1m). La longueur des liens qui correspond aux cuisses et aux jambes est aussi identique, soit de 0,5 m. La longueur et la largeur du corps correspondent aux distances entre les axes des hanches et sont, dans l'ordre, de 1m et de 0,5m. La masse du corps et de chacun des liens est prédéterminée. La masse ciblée du robot est de 75 kg. Comme il est possible de voir dans le tableau III, la configuration des genoux est vers l'extérieur. La hauteur du corps est définie à 0,8 m. Cette hauteur correspond à la hauteur de l'axe des hanches par rapport au sol. Toutes ces données apparaissent dans le tableau qui suit:

Tableau III

Données initiales et configuration du robot

Configuration des pattes	Configuration genoux	Masse Robot (kg)	Masse de la charge(kg)	Vitesse corps (m/s)	Hauteur corps (m)
4 Barres	<>	75	15 ou 100	1	0,8
Longueur pas (m)	Hauteur pas (m)	Facteur de rendement	type de démarche	longueur de la cuisse (m)	Longueur de jambe(m)
0,6	0,050	76,0%	X	0,5	0,5

La configuration est une structure à quatre barres (figure 46) semblable à un pantographe, à la seule différence que les actionneurs sont angulaires et non linéaires. Ce système permet de positionner le moteur du genou au niveau de la hanche et de faire le transfert d'énergie par le mécanisme, allégeant ainsi la patte.

Toutes les données du tableau sont préliminaires, car elles ne correspondent pas à une solution optimisée. Tous les tests par simulation seront effectués sur terrains plats, ensuite sur terrains

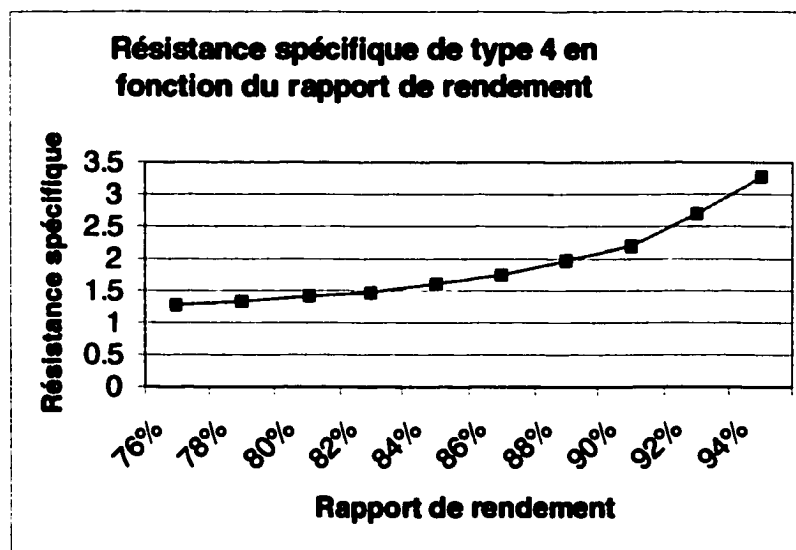
variés et pour finir, dans des escaliers standards. La vitesse de marche et la charge à transporter seront différentes selon le terrain, comme énoncé dans le cahier de charge. La liste complète des résultats se trouve en annexe 5.

4.2 Terrain plat

4.2.1 Variable de facteur de rendement

Selon les conditions initiales, il est possible de dessiner un graphique représentant l'effet du rapport de rendement sur la résistance spécifique (ϵ type 2) [50], cette variable est expliquée en détail à la section 1.2.1.1. Chacun des graphiques qui vont suivre utilise les données du tableau III comme référence.

Le graphique 7 montre la tendance de l'augmentation du rapport de rendement. La valeur de 75 % serait une meilleure mais il y aurait trop d'incertitude lors du transfert de pas. La meilleure solution dans les différents paramètres testés est un facteur de rendement de 76 %, mais les conditions de stabilité les plus sûres sont à l'autre extrémité du graphique, soit à 94 %.



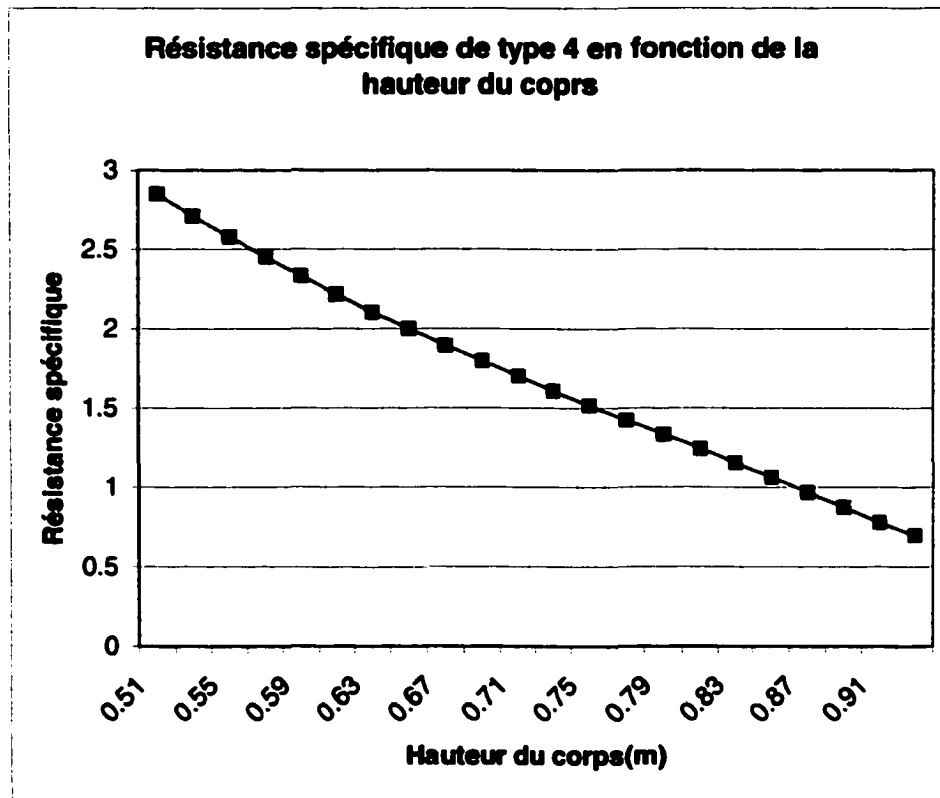
Graphique 7 Influence du rapport de rendement sur la résistance spécifique.

4.2.2 Hauteur du corps

La variable de hauteur du corps correspond à la position de l'axe de la hanche par rapport au sol. Les résultats du graphique présentent une relation directe; plus la hauteur du corps est grande, plus ϵ est petit.

Les quadrupèdes, comme bien des animaux, marchent presque en pleine extension. Il y a par contre une limite qui est dépendante de la longueur du pas désiré.

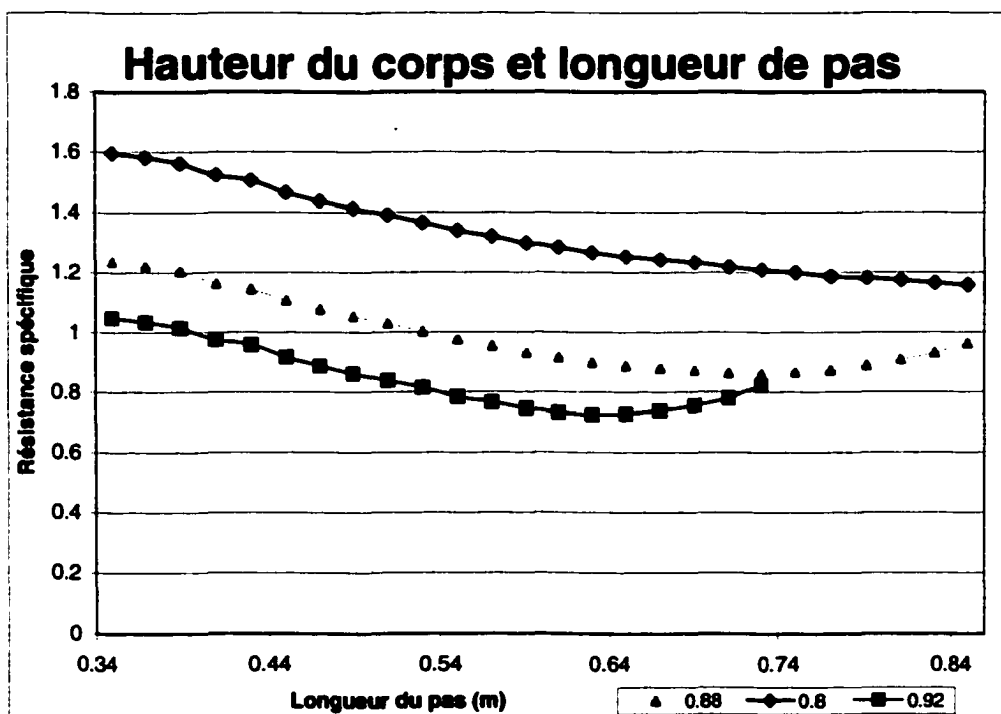
Dans le cas d'un pas de 60 cm et d'une hauteur de 5 cm, la hauteur du corps ne peut pas dépasser les 93 cm en considérant que la longueur des pattes reste constante à 1 (m). En changeant la longueur du pas, beaucoup de données sont directement changées.



Graphique 8 Résistance spécifique en fonction de la hauteur du corps.

4.2.3 Longueur du pas

Puisque la longueur du pas influence la hauteur du corps, il est judicieux de choisir une hauteur de corps plus basse, permettant ainsi une plus grande variété de longueur de pas. Cependant, ceci ne nous permet pas de définir la meilleure hauteur du corps ou la meilleure longueur de pas, puisque les deux variables sont trop inter-reliées. Au graphique 9, la première évaluation se fera à une hauteur de corps de 0.88 m, la seconde à 0.8 m et la dernière à 0.92 m.



Graphique 9 Résistance spécifique en fonction de la longueur du pas.

La première constatation est que, même si la longueur du pas est augmentée, cela ne veut pas dire qu'il y aura diminution de la consommation d'énergie. La courbe est à un point minimum et elle remonte par la suite. Plus le pas est long, plus il est risqué d'avoir une singularité dans le mouvement. La comparaison des trois hauteurs de corps précédents est faite dans le tableau IV qui suit:

Tableau IV

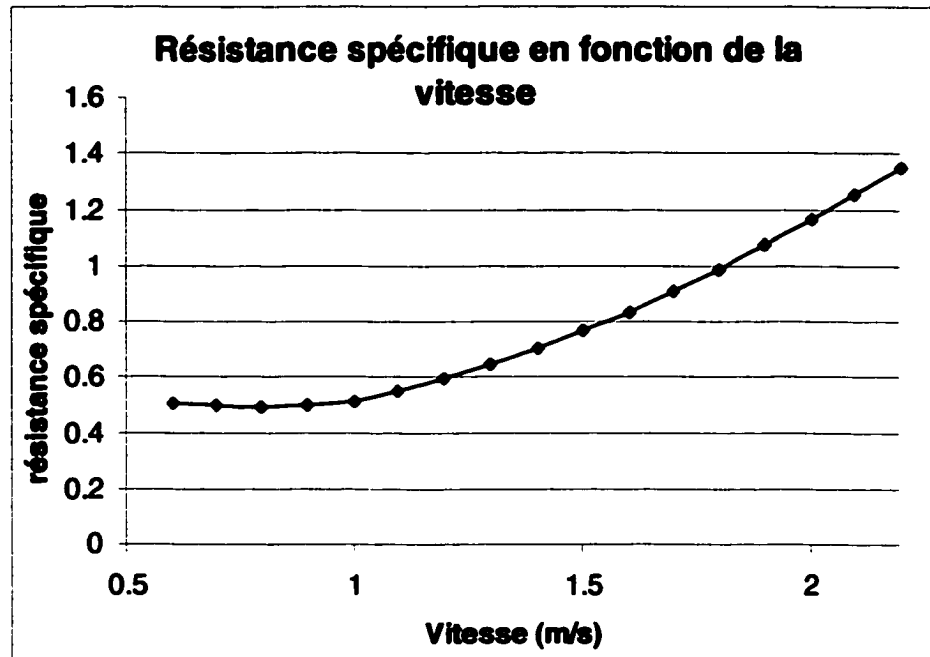
Résumé des effets de la longueur du pas pour trois hauteurs de corps sur la consommation en énergie

Hauteur du corps(m)	Meilleure longueur de pas(m)	Valeur de la résistance spécifique type 4	Puissance mécanique moyenne(Watt)
0.8	0.85	1.15795	1135.97
0.88	0.73	0.86317	846.77
0.92	0.63	0.72622	712.42

La constatation observée est que plus le corps est haut, plus le pas est court et plus la dépense énergétique est basse. Comme la vitesse et la masse dans ces résultats ne change pas, la résistance spécifique est proportionnelle à la puissance mécanique moyenne.

4.2.4 Vitesse du corps

La vitesse a une influence assez marquée sur la dépense en énergie. Cela est similaire dans les différentes plages de démarche utilisées.

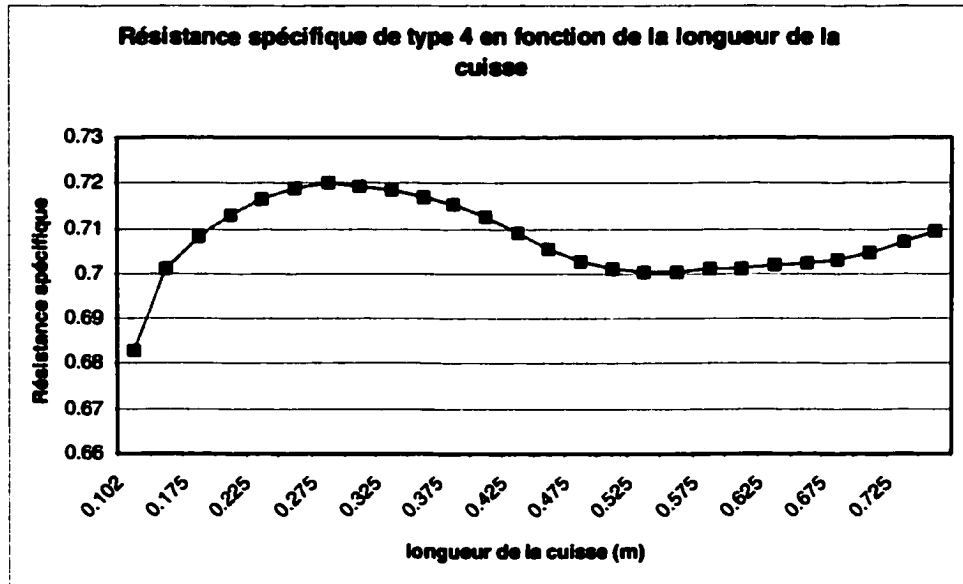


Graphique 10 Résistance spécifique en fonction de la vitesse du corps.

L'important est de trouver la bonne vitesse en fonction des autres paramètres. Comme le démontre le graphique 10, une vitesse de 0.8 m/s, minimise la résistance spécifique et par conséquent, la consommation d'énergie.

4.2.5 Longueur de la cuisse

Lorsque la longueur de la cuisse est modifiée, la longueur de la patte totale ne change pas, mais la jambe se modifie de façon inversement proportionnelle à la cuisse. Le test qui suit consiste à modifier la longueur de la cuisse afin de connaître l'influence de cette variable sur l'ensemble. Le graphique 11 nous montre que son influence n'est pas du tout linéaire.



Graphique 11 Résistance spécifique en fonction de la longueur de la cuisse.

Selon les conditions présentées à la section 4.1, il y a discontinuité dans la courbe si la cuisse devient plus petite que 0,1029 (m). Les données sont très petites d'un coté et très grandes de l'autre. Selon les spécifications du cahier de charge, il faut que le robot passe la patte par-dessus des obstacles de 40 (cm). La cuisse doit donc avoir un minimum de 0.20 m et une longueur maximum de 0.6 (m). Cette longueur de cuisse ne permet pas de réaliser toutes les trajectoires de pas qui sont demandées et cela restreint les possibilités mécaniques.

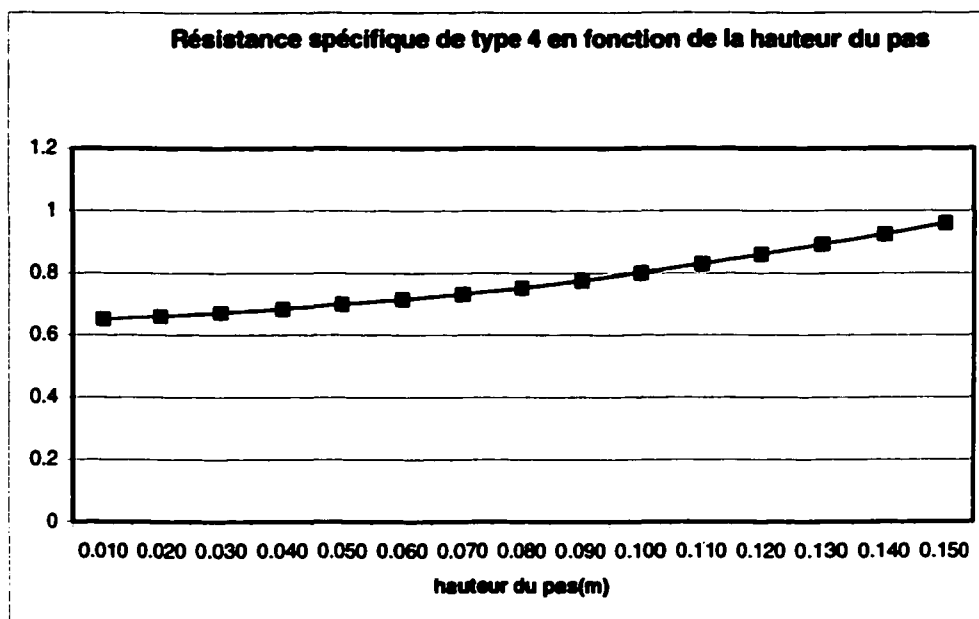
Plus la longueur de la cuisse se rapproche de cette limite, meilleure est la consommation d'énergie mais plus les possibilités de déplacement sont limitées.

Il est donc préférable de définir la longueur de la cuisse dans la zone autour de 0,525 (m). Cette zone du graphique permet de rencontrer les besoins du cahier de charge. Dans les autres terrains, ce ne sera pas nécessairement le cas, mais on le verra dans la prochaine étape de la démarche, après avoir testé encore quelques variables.

4.2.6 La hauteur du pas

La hauteur du pas influence seulement la portion de trajectoire sans contact. Plus le pas est haut, plus les vitesses aux actionneurs doivent être grandes, étant donné que le pied doit parcourir une

plus grande distance dans un même laps de temps. Ce faisant, l'énergie augmente en fonction de la hauteur du pas. Cette affirmation est illustrée au graphique 12. L'augmentation est presque linéaire en fonction de la hauteur du pas.



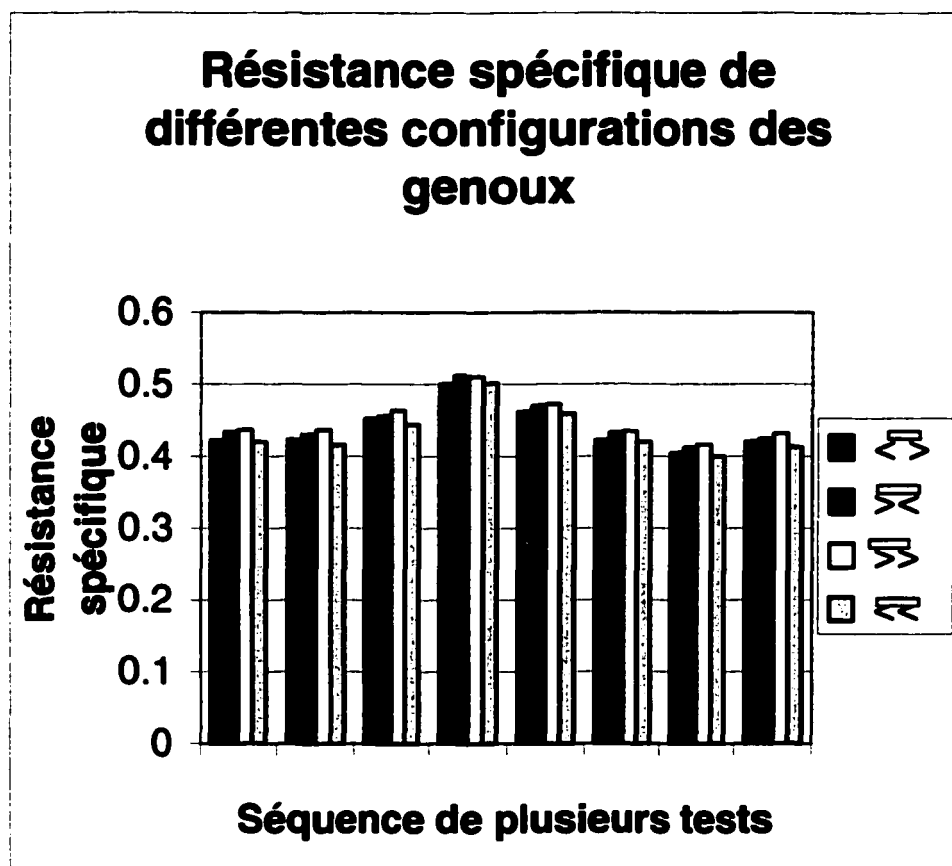
Graphique 12 Résistance spécifique en fonction de la hauteur du pas.

La possibilité que le pied accroche des obstacles diminue lorsque le pas s'effectue plus haut. Il faut donc faire des compromis en fonction du terrain.

4.2.7 La configuration des genoux

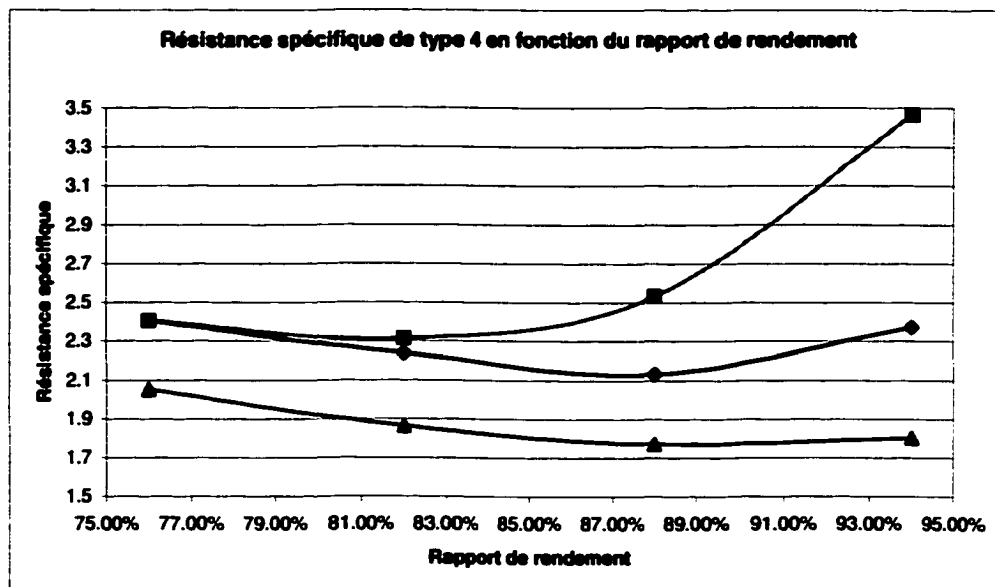
Ce paramètre peut prendre quatre états différents, tel que montré sur le graphique 13. Contrairement à ce qu'on pourrait croire, cette configuration influence tous les indices de performance. La seule façon de comparer avec les résultats précédents est de combiner plusieurs tests. La configuration des genoux modifie la position critique qui génère les couples les plus élevés. Le graphique 13 montre la variation des résultats en fonction de plusieurs tests effectués en faisant varier la hauteur du corps et la longueur du pas. Dans les quatre cas de configuration, les résultats se suivent relativement bien. Dans le cas du terrain plat, le choix le plus approprié est déterminé par d'autres analyses selon les conditions relatives aux vitesses et puissance maximum au joint. Pour ces conditions particulières, les deux genoux orientés vers l'arrière se

distinguent légèrement comme le meilleur choix. Les valeurs des différents tests sont décrits en annexe 6.



Graphique 13 Résistance spécifique en fonction de la configuration des genoux.

Tous ces tests ont été repris pour d'autres types de terrains, soit sur terrains variés et dans des conditions d'escaliers standards et non-standards. Ces résultats se retrouvent partiellement en annexe 5. Une analyse complète à l'aide du plan d'expérience permet de faire ressortir des subtilités dans l'influence des différentes variables. Le graphique 14 représente des variante du RR dans le plan d'expérience. Dans certaine condition le l'augmentation du rapport de rendement améloire les conditions mais aussi le contraire dans d'autres.



Graphique 14 Résistance spécifique en fonction du rapport de rendement dans le plan d'expérience.

Une conclusion importante de ces résultats est que pour chaque type de terrains, des solutions différentes ressortent comme étant meilleures. Il en revient donc au concepteur de déterminer les conditions plus probables de fonctionnement et l'influence du terrain sur l'ensemble de la conception.

Après avoir calculé tous ces résultats, il est possible d'évaluer l'utilité de cet outil et de voir son impact sur le processus de conception.

CHAPITRE 5

ANALYSE ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Deux points seront analysés ici, la première étant le rappel du processus utilisé et la deuxième étant la validation de l'utilité de cet outil et des résultats obtenus. Cette validation sera faite en comparant les résultats avec d'autres recherches et ensuite, avec un logiciel commercial de simulation. Ensuite, les résultats seront comparés avec d'autres robots afin de démontrer l'amélioration qui peut être réalisée grâce à cet outil.

Le processus de recherche a été défini dans le chapitre 2. Ce même processus a été utilisé dans le chapitre 5 au niveau de la définition du problème, du cahier des charges, de la solution préliminaire et l'évaluation mathématique de cette solution. Plusieurs itérations ont été réalisées afin d'améliorer cette solution. Mais, après avoir fait les calculs et déterminé les paramètres d'une solution, il reste à analyser et à interpréter les différentes itérations afin de valider s'ils satisfont aux exigences du cahier des charges.

Certains des résultats du chapitre précédent satisfont au cahier des charges. Les résultats du chapitre et de l'annexe permettent également de déterminer les dimensions mécaniques et de choisir des paramètres de démarche économique en énergie.

À partir de la solution préliminaire décrite au chapitre 5, une multitude d'autres solutions potentielles ont vu le jour. Toutes ces solutions ont été évaluées les unes par rapport aux autres, en fonction de la résistance spécifique expliquée aux sections 1.2.1.1 et 4.2. La plupart des solutions répondent aux exigences du cahier des charges, mais il faut considérer les meilleures solutions, soient celles qui sont les plus économiques en énergie.

Notre cahier des charges spécifiait le besoin d'avoir un robot qui peut aller dans tous les lieux possibles. Ainsi, les résultats sur terrain plat sont moins significatifs et les données sur terrains variés devraient avoir une plus grande pondération. Il s'agit donc de retenir la solution qui offre le meilleur compromis.

La solution qui a été présentée comme solution préliminaire est proche d'un minimum local de la fonction. Ce robot a donc évolué en même temps que le développement de cet outil de conception. Le tableau permet de constater que le type de terrains (accidenté ou plat) impose une

façon de marcher. D'une part, le terrain accidenté nécessite de faire de plus petit pas et donc permet de garder le corps au même niveau par rapport au sol.

Tableau V

Résumé des meilleurs résultats sur différents terrains en fonction de la résistance spécifique en considérant le cahier de charge

Terrain	Configuration	Poids(kg)	Vitesse corps (m/s)	Hauteur corps (m)	longueur pas (m)	Hauteur pas (m)	Rapport de rendement	longueur cuisse (m)	Longueur jambe (m)
Plat	4Barres <	175	1	0.93	0.6	0.010	76%	0.5	0.5
Plat	4Barres <	90	2	0.9	0.75	0.030	76%	0.5	0.5
Escalier	4Barres <<	90	0.5	0.89	0.35	0.224	76%	0.5	0.5
Varié	4Barres <	90	0.5	0.92	0.35	0.030	76%	0.5	0.5

Les tests permettent de constater que le rapport des longueurs de membrure ne change pas selon le type de terrain. L'équilibre entre les longueurs est donc importante. Le logiciel développé permet de faire le choix d'une solution mécanique tout en précisant des paramètres de marche qui amélioreront la consommation en énergie dans différentes conditions.

La simulation graphique permet aussi de visualiser le déplacement du robot dans l'environnement et de voir les possibilités de collision. Cette approche a permis de choisir les paramètres de marche afin de diminuer les risques de collision dans les escaliers, ce qui nécessite de considérer les collisions de toute la jambe avec les marches.

Comme plusieurs chercheurs ont étudié la marche animale et dérivé des règles de fonctionnement [61], il est possible de valider nos résultats avec celle-ci. De façon générale, la longueur du pas pour la marche est de 60 % de la longueur total de la jambe. De plus, selon les travaux de Froude, expliqué à la section 1.2.3 , la marche n'est plus efficace énergétiquement dépassé une certaine vitesse. Dans notre cas, la vitesse limite est de 2.2 m/s (équation 5.4), car la consommation en énergie augmente radicalement. Cette constatation se voit bien sur la graphique 10 représentant la résistance spécifique en fonction de la vitesse. Les actionneurs atteignent, eux aussi, des vitesses qui dépassent leur capacité physique.

Capra devrait donc marcher jusqu'à une vitesse correspondant à une valeur du nombre de Froude de 0,5. Et cette valeur s'obtient par le calcul suivant:

$$\text{Nombre de Froude} = \frac{u^2}{gh} \quad (5.1)$$

$$g = 9.81 \quad (5.2)$$

$$h = 1 \text{ m} \quad (5.3)$$

$$0,5 = \frac{u^2}{9,81 \cdot 1} \Rightarrow u = \sqrt{0,5 \cdot 9,81 \cdot 1} = 2,214 \text{ m/s} \quad (5.4)$$

Comme la vitesse a une influence à la fois sur la puissance et sur la résistance spécifique, il est important de clarifier un point. La dépense en énergie, soit la puissance moyenne utilisée, n'est pas directement proportionnelle à la résistance spécifique due à l'influence de la vitesse. Il est possible d'avoir une puissance moyenne de déplacement plus faible en parcourant une même distance plus lentement. Évidemment, puisque le robot dépense moins pendant plus de temps, c'est donc sensiblement le même travail effectué. La relation n'est pas tout à fait linéaire dans notre cas et c'est pourquoi la résistance spécifique est un indicateur plus réaliste et plus précis. Ceci est bien apparent en annexe 5.

Les trajectoires des pattes ont aussi fait l'objet de validation avec un autre logiciel de simulation. Les données ont servi à déterminer la position des articulations du modèle construit dans Working Model. Ceci a permis de valider non seulement les courbes d'effort, mais aussi la conservation de l'équilibre selon les trois dimensions et non seulement dans le plan. La représentation en 3D de Working Model est présentée à la figure 48.

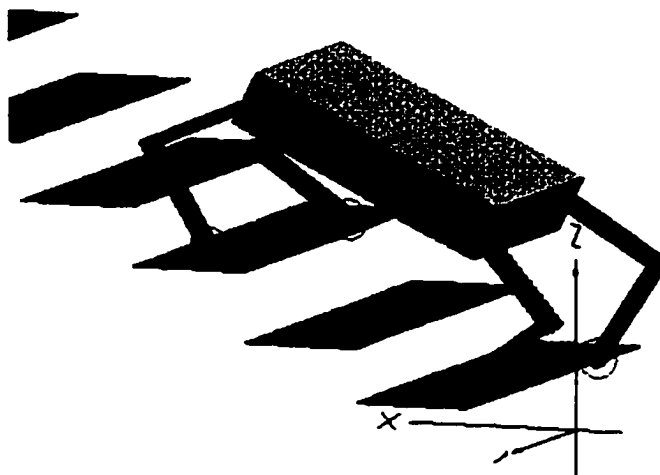


Figure 48 Model 3D dans Working Model

Working Model a permis de valider que les hypothèse étaient valables. L'influence de la dynamique du corps sur les pattes est minimal à basse vitesse. Les impacts sont réduits au maximum en définissant bien les trajectoires des pattes.

Il est intéressant de comparer les résultats obtenus avec d'autres qui ont utilisé les mêmes indicateurs, soit la résistance spécifique. La figure 49 représente justement plusieurs moyens de transport différents. La résistance spécifique est tracée en fonction de la vitesse. Cette représentation illustre la facilité qu'a un véhicule à déplacer sa masse en fonction de la puissance mécanique moyenne. Un robot quadrupède qui pourrait se comparer avec Capra serait le Hydrolic Quadrupede de Ralbert, qui est conçu pour la course ou le saut, c'est pourquoi il possède une courbe descendante. La plupart des robots évalués ne marchent pas ils sautent c'est pourquoi ils sont moins efficaces à basse vitesse.

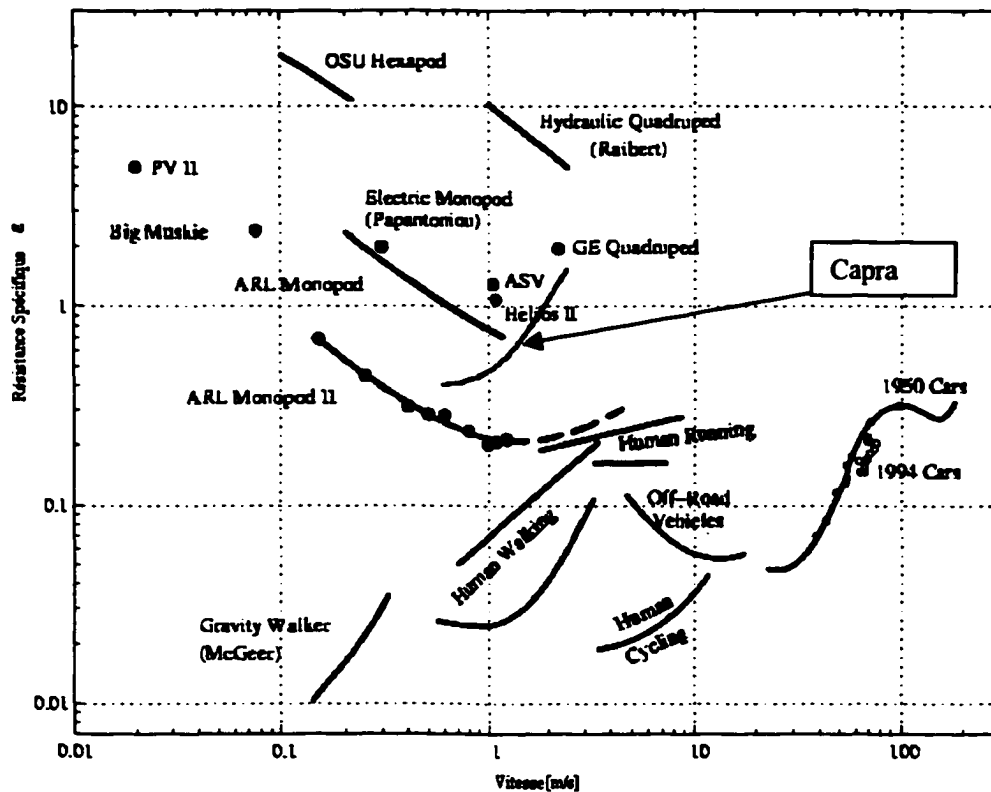


Figure 49 Résistance spécifique de différents moyens de transport

Cet outil a aussi permis à notre équipe de faire des choix qui, selon l'évaluation théorique de la simulation, sont meilleurs que d'autres robots quadrupèdes. Il est difficile de comparer un quadrupède avec un monopode car le mode de déplacement a une bonne influence sur la dépense énergétique. Dans la figure (49), la plupart des robots ont peu ou pas de capacité de transport de charge, ce qui n'est pas notre cas. C'est un point qui change radicalement un design. Ceci aidera également à faire un robot plus performant.

CHAPITRE 6

TRAVAUX FUTURS

Cette thèse explique les biens fondés d'un outil de design. Il permet le développement de robots marcheurs à quatre pattes possédant chacune deux degrés de liberté, tout en évaluant des paramètres mécaniques et en utilisant la marche comme validation. Cependant, cet outil n'est pas complet. Il serait intéressant de continuer le développement sur certains éléments.

Premièrement, la variété des architectures, ou types des robots marcheurs, devrait être plus grande. Il n'y a que les robots quadrupèdes à deux degrés de liberté par pattes qui peuvent être analysés actuellement. La modélisation de robots avec des pattes ayant des configurations différentes pourrait être ajoutée. Ceci amènerait à considérer les forces latérales et permettrait la rotation du corps.

Deuxièmement, le nombre de pattes est un autre sujet d'intérêt, puisque les quadrupèdes ne sont pas les seuls robots. En effet, les hexapodes sont très similaires dans les démarches utilisées et auraient avantage à être intégrés.

Troisièmement, la démarche est un autre aspect qui pourrait être plus développée. En effet, l'ajout d'autres démarches comme le trot, le saut et le galop, augmenterait la variété de tâches à étudier. Ces démarches, pour les quadrupèdes, demandent une analyse de la dynamique du système plus approfondie.

Il a aussi été constaté que la géométrie du sol influence beaucoup le mouvement du corps. Le glissement et l'impact, dûs au contact des pattes au sol, méritent grandement d'être considérés dans les travaux futurs afin de préciser l'interaction entre le robot et son environnement. En effet, lorsqu'il est question de grande accélération, comme dans la course par exemple, il y a souvent glissement, ce qui ajoute aux éléments de dépenses énergétiques.

CONCLUSION

Cette recherche avait pour but d'aider les concepteurs de robots marcheurs à concevoir une mécanique plus économique en énergie. Elle a donné au concepteur mécanique un outil d'aide à la conception mécanique utile et rapide. Cet outil logiciel a été développé et a servi au design d'un robot.

Il a été montré que les robots marcheurs sont caractérisés par des structures mécaniques complexes. De plus, les tâches qu'ils ont à accomplir ne sont pas simples à décrire. En effets, la tâche étant de se déplacer, il faut ainsi considérer le mode de déplacement, ce qui fait un ensemble de conditions de fonctionnement et de contraintes assez variées.

L'ensemble du problème est donc modélisé afin de considérer toutes ses particularités. Les types de terrain sont modélisés. La démarche est modélisée de façon à représenter une marche en équilibre statique. La mécanique est paramétrée de sorte que les robots quadrupèdes puissent être optimisés.

L'optimisation se fait principalement en considérant le critère énergétique (résistance spécifique) afin de préciser les meilleurs paramètres dimensionnels pour une application particulière. Les résultats nous donnent aussi des indices sur les paramètres du mode de déplacement les plus efficaces.

L'utilisation du «LADRMQ» pour le design du robot Capra a donné une première analyse qui permet de préciser les lignes directrices du design. Il a démontré son utilité dans le choix des actionneurs et dans le dimensionnement des structures qui composent le corps et les pattes de ce robot quadrupède. Les couples aux articulations ont permis le choix des moteurs et la comparaison en dépense d'énergie avec d'autres méthodes de transport. L'utilisation de la modélisation de l'environnement a démontré les limitations du robot Capra et les possibilités qu'offre cette conception mécanique.

Nous avons constaté les avantages de cet outil lors de son utilisation dans le processus de design. Il a également mis en évidence que certaines variables ont plus d'influence sur l'énergie globale du système. La vitesse et la longueur des membrures sont les variables qui font varier le plus la dépense en énergie et ce sont celles qui doivent être observées en tout premier lieu.

Il serait intéressant d'appliquer les résultats de ces travaux au développement de robots marcheurs en considérant l'apport de LADRMQ dans le but de développer des algorithmes de contrôle plus performants afin de rendre les robots marcheurs plus autonomes énergétiquement.

ANNEXE 1

DÉVELOPPEMENT DES ÉQUATIONS DE CONTACT AU SOL

$$\Sigma F_z = F_3 + F_2 + F_1 - F_C = 0$$

$$\Sigma M_x = F_3 y_3 + F_2 y_2 + F_1 y_1 = 0$$

$$\Sigma M_y = F_3 x_3 + F_2 x_2 + F_1 x_1 - A_2 (h_2 + h_3) - A_1 h_1 = 0$$

Cas où la patte 0 est sans contact, donc F_0 et $A_0 = 0$

$$A_1 = (F a (y_3 + y_2)) / (y_3 + y_2 + 2y_1)$$

$$A_2 = (F a - A_1) / 2$$

$$A_3 = A_2$$

$$F_3 = \frac{(F g y_2 x_1 + F g x_2 y_1 + A_1 h_1 y_2 + A_1 h_1 y_1 + A_2 h_2 y_2 + A_2 h_2 y_1 + A_2 h_3 y_2 + A_2 h_3 y_1)}{(y_2 x_1 + y_3 x_2 - y_3 x_1 + x_2 y_1 + x_3 y_2 + x_3 y_1)}$$

$$F_1 = (F g y_2 - F_3 y_2 + F_3 y_3) / (y_2 + y_1);$$

$$F_2 = F g - F_3 - F_1$$

Cas où la patte 3 est sans contact donc F_3 et $A_3 = 0$

$$A_1 = F a y_2 / (2y_2 + y_1 + y_0)$$

$$A_0 = A_1$$

$$A_2 = F a - 2A_1$$

$$F_0 = \frac{(F g y_2 x_1 + F g x_2 y_1 + A_2 h_2 y_2 + A_2 h_2 y_1 - A_1 h_0 y_2 - A_1 h_0 y_1 + A_1 h_1 y_2 + A_1 h_1 y_1)}{(y_2 x_1 - y_0 x_2 + y_0 x_1 + x_2 y_1 + x_0 y_2 + x_0 y_1)}$$

$$F_1 = (F g y_2 - F_0 y_2 - F_0 y_0) / (y_2 + y_1)$$

$$F_2 = F g - F_0 - F_1$$

Cas où la patte 2 est sans contact donc F_2 et $A_2 = 0$

$$A_1 = Fay_3 / (2y_3 + y_0 + y_1)$$

$$A_0 = A_1$$

$$A_3 = Fa - 2A_1$$

$$F_1 = \frac{(Fgx_0y_3 + A_1h_0y_0 + A_1h_0y_3 - A_3h_3y_0 - A_3h_3y_3 - A_1h_1y_0 - A_1h_1y_3 + Fgy_0x_3)}{(x_0y_3 + x_1y_0 + x_1y_3 + y_0x_3 + y_1x_0 - y_1x_3)}$$

$$F_3 = (Fgy_0 - F_1y_0 + F_1y_1) / (y_0 + y_3)$$

$$F_0 = F_g - F_3 - F_1$$

Cas où la patte 1 est sans contact donc F_1 et $A_1 = 0$

$$A_2 = Fay_0 / (2y_0 + y_2 + y_3)$$

$$A_3 = A_2$$

$$A_0 = Fa - 2A_2$$

$$F_2 = \frac{(Fgx_3y_0 + A_2h_3y_3 + A_2h_3y_0 - A_0h_0y_3 - A_0h_0y_0 - A_2h_2y_3 - A_2h_2y_0 + Fgy_3x_0)}{(x_3y_1 + x_2y_3 + x_2y_0 + y_3x_0 + y_2x_3 - y_2x_0)}$$

$$F_3 = (Fgy_0 - F_2y_0 - F_2y_2) / (y_0 + y_3)$$

$$F_0 = F_g - F_3 - F_2$$

Cas où toutes les pattes sont en contact

$$A_0 = A_1 = A_2 = A_3 = Fa/4$$

$$F_0 = F_1 = F_2 = F_3 = Fg/4$$

ANNEXE 2

MATRICE DE FORME DE LA COURBE DE TRAJECTOIRE DE LA PATTE SANS CONTACT

```

function [coef,time_c]=traj_air_def_coef(Pi,Pf,vPi,vPf,shapes,h_pas,elon,decal,F,FSsol,heig,time)
%traj_air_def_coef([0 0 0],[0.5 0 0],[1 0 0],[1 0 0],3,0.08,1,0,1/2,10,0)
%traj_air_def_coef([0 0 0],[0.5 0 0],[1 0 0],[1 0 0],4,0.08,1,0,1/2,10,0)
% l => longueur de pas
% shapes => nom de la forme choisie
% h => hauteur de la forme du pas
% elon => elongation des rondeur en avant et arriere pas
%traj_air_process([0 0 0],[100 0 0],[-1000 0],[1000 0 0],4.80,1,0,1/2,100,0):
% n+1 points - n segments
% ordre : n Pos(i)(point initial du segment i), n Pos(i+1)(point final du segment i).
%          n-1 zeros (continuite de vitesse), vitesse initiale,
%          n-1 zeros (continuite d'acceleration), vitesse finale.
if length(who('Pi'))==0
    disp(['Gth.dGth,long,los,Vcf,Vcd] = fp_shape(l,shapes,h,elon,decal,F,ang,FSsol,heig)')
    disp('un minimum de parametre doit etre definit')
    help fp_shape
else
    l=sqrt(sum((Pf-Pi).^2));
    ang=atan2(Pf(2)-Pi(2),Pf(1)-Pi(1)); %pas 3d encore
    pas=l;
    vitesse_marche=1;
    Vit_ref = (vPi+vPf)/2;
    Vittot=l+sum(Vit_ref);
    % nombre de segments

    transt=rotz(ang*180/pi);
    transt_neg=rotz(-ang*180/pi);

    switch shapes
    case 1
        % disp('Forme de goutte')
        Pn=[[-l-h_pas/2*F*elon h_pas/2*F 0];...
            [-l h_pas*F 0];...
            [-2*1/3 (h_pas+2*h_pas*F)/3 0];...
            [-1/3 (2*h_pas+h_pas*F)/3 0];...
            [0 h_pas 0];...
            [h_pas/2*elon h_pas/2 0]];

        vPn=[[0 h_pas*F 0];...
            F*[h_pas h_pas^2*(1-F)/l 0];...
            [1 h_pas*(1-F)/l 0];...%50:...
            [1 h_pas*(1-F)/l 0];...%50:...
            F*[h_pas h_pas^2*(1-F)/l 0];...%50:...
            [0 -h_pas 0]];
    case 2
        % disp('Forme de bombe top')
        vPn=[[-l-h_pas/2*F*elon h_pas*3/8*F 0];...
            [-l h_pas*F 0];...
            [-1/2 h_pas 0];...
            [0 h_pas*F 0];...
            [h_pas/2*F*elon F*h_pas*3/8 0]];

```

```

lh=sqrt((l/2+h_pas/2*F*elon)^2 +(h_pas-h_pas*F/2)^2)

vPn=[ [0 h_pas*F 0];...
      [1/2+h_pas/2*F*elon h_pas-h_pas*F/2 0]/lh*h_pas/100*F;...
      [1 0 0];...%/50;...
      [1/2+h_pas/2*F*elon -h_pas+h_pas*F/2 0]/lh*h_pas/100*F;...
      [0 -h_pas*F 0]];

case 3
% disp('Forme de balistic')
Pn=[[-h_pas/2*elon h_pas/2 0];...
     [0 h_pas 0];...
     [1/2 (h_pas*F) 0];...
     [1 h_pas 0];...
     [1+h_pas/2*elon h_pas/2 0]];

vPn=[[0 h_pas*5 0];...
     [h_pas*1 0 0];...
     [1*2 0 0];...%/50;...
     [h_pas*1 0 0];...%/50;...
     [0 -h_pas*5 0]]*Vittot*20;
dt=[1/2 1.5 1 1 1.5 1/2];
case 4 %bombe case 2
% disp('Forme de coupole')
Pn=[[-h_pas/2*F*elon F*h_pas/2 0];...
     [1/2 h_pas 0];...
     [1+h_pas/2*F*elon h_pas/2*F 0]];

vPn=[ [0 h_pas 0];...
      2*[1 0 0];...%/50;...
      [0 -h_pas 0]]*Vittot*10;
dt=[0.45 1.55 1.55 0.45]; %total 4 nbsegmen
case 5 %bombe case 2
% disp('Forme de coupole')
Pn=[[-h_pas/2*F*elon F*h_pas/2 0];...
     [1/4 h_pas 0];...
     [1*3/4 h_pas 0];...
     [1+h_pas/2*F*elon h_pas/2*F 0]];

vPn=[ [0 h_pas 0];...
      2*[1 0 0];...%/50;...
      2*[1 0 0];...%/50;...
      [0 -h_pas 0]]*Vittot*10;
dt=[0.45 1.55 1 1.55 0.45]; %total 4 nbsegmen
case 6 %bombe case 2
% disp('Forme de coupole')
Pn=[[1/6 h_pas 0];...
     [1*5/6 h_pas 0]];

vPn=[ .9*[1 0 0];...%/50;...

```



```

.9*[1 0 0]]*8;

dt=[0.9 1.2 0.9]; %total 3 nbsegmen

case 7 %bombe case 2
% disp('Forme de coupole')
Pn=[[1/2 h_pas 0]];

vPn=[ 1.5*[1 0 0]]*Vittot*10;
dt=[1 1]; %total 2 nbsegmen
otherwise
end
%tetang=ang*180/pi;
%modification de l'orientation et de la position des points en fonction de l'angle
grand=prod(size(Pn));
Pn=[Pn ones(length(Pn(:,1)),1)];
vPn=[vPn ones(length(vPn(:,1)),1)];
Pn=trans(Pi+[decal -heig 0])*transt*Pn';
vPn=transt*vPn';
Pline=reshape(Pn(1:3,:),1,grand);
Ppline=reshape(vPn(1:3,:),1,grand);
%pause

% definition des segments
Pos = [Pi;...
       Pn(1:3,:)'
       Pf];
Vel = [-vPi;...
       vPn(1:3,:)'
       -vPf];
Acc_i = [0,0,0];
Acc_f = [0,0,0];
time;
Nb_seg = length(Pos)-1;
%deltaT = pas/Vit_ref(1)/Nb_seg;
deltaT = time/Nb_seg;

T = deltaT*dt;%[2:2:2];%
nbk=length(Pi);

A = zeros(6*Nb_seg,6*Nb_seg,nbk);
for k = 1:nbk
    for i = 1:Nb_seg-1
        % position initiale du segment i
        A(i,6*i-5,k) = 1;
        % position finale du segment i
        A(i+Nb_seg,6*i-5,k) = 1;
        A(i+Nb_seg,6*i-4,k) = T(i);
    end
end

```

```

A(i+Nb_seg,6*i-3,k) = T(i)^2;
A(i+Nb_seg,6*i-2,k) = T(i)^3;
A(i+Nb_seg,6*i-1,k) = T(i)^4;
A(i+Nb_seg,6*i,k) = T(i)^5;
% vitesse initiale du segment i
A(i+2*Nb_seg,6*i-4,k) = 1;
% vitesse finale du segment i
A(i+3*Nb_seg,6*i-4,k) = 1;
A(i+3*Nb_seg,6*i-3,k) = 2*T(i);
A(i+3*Nb_seg,6*i-2,k) = 3*T(i)^2;
A(i+3*Nb_seg,6*i-1,k) = 4*T(i)^3;
A(i+3*Nb_seg,6*i,k) = 5*T(i)^4;
% continuité d'accélération
A(i+4*Nb_seg,6*i-3,k) = 2;
A(i+4*Nb_seg,6*i-2,k) = 6*T(i);
A(i+4*Nb_seg,6*i-1,k) = 12*T(i)^2;
A(i+4*Nb_seg,6*i,k) = 20*T(i)^3;
A(i+4*Nb_seg,6*i+3,k) = -2;
% continuité de la dérivée d'accélération
A(i+5*Nb_seg,6*i-2,k) = 6;
A(i+5*Nb_seg,6*i-1,k) = 24*T(i);
A(i+5*Nb_seg,6*i,k) = 60*T(i)^2;
A(i+5*Nb_seg,6*i+4,k) = -6;

end;
% point initial du segment n
A(Nb_seg,6*Nb_seg-5,k) = 1;
% position finale du segment n
A(2*Nb_seg,6*Nb_seg-5,k) = 1;
A(2*Nb_seg,6*Nb_seg-4,k) = T(Nb_seg);
A(2*Nb_seg,6*Nb_seg-3,k) = T(Nb_seg)^2;
A(2*Nb_seg,6*Nb_seg-2,k) = T(Nb_seg)^3;
A(2*Nb_seg,6*Nb_seg-1,k) = T(Nb_seg)^4;
A(2*Nb_seg,6*Nb_seg,k) = T(Nb_seg)^5;
% vitesse initiale du segment n
A(3*Nb_seg,6*Nb_seg-4,k) = 1;
% vitesse finale du segment n
A(4*Nb_seg,6*Nb_seg-4,k) = 1;
A(4*Nb_seg,6*Nb_seg-3,k) = 2*T(Nb_seg);
A(4*Nb_seg,6*Nb_seg-2,k) = 3*T(Nb_seg)^2;
A(4*Nb_seg,6*Nb_seg-1,k) = 4*T(Nb_seg)^3;
A(4*Nb_seg,6*Nb_seg,k) = 5*T(Nb_seg)^4;
% accélération initiale
A(5*Nb_seg,3,k) = 1;
% accélération finale
A(6*Nb_seg,6*Nb_seg-3,k) = 2;
A(6*Nb_seg,6*Nb_seg-2,k) = 6*T(Nb_seg);
A(6*Nb_seg,6*Nb_seg-1,k) = 12*T(Nb_seg)^2;
A(6*Nb_seg,6*Nb_seg,k) = 20*T(Nb_seg)^3;

end;
%A
%pause

```

```

Vect = zeros(6*Nb_seg,nbk);
for i = 1:Nb_seg
    Vect(i,:) = Pos(i,:);
    Vect(i+Nb_seg,:) = Pos(i+1,:);
    Vect(i+2*Nb_seg,:) = Vel(i,:);
    Vect(i+3*Nb_seg,:) = Vel(i+1,:);
end;
Vect(5*Nb_seg,:) = Acc_i;
Vect(6*Nb_seg,:) = Acc_f;

for k = 1:nbk
    % coeff(:,k) = inv(A(:,k))*Vect(:,k);
    coeff(:,k) = A(:,k)\Vect(:,k);
end

time_c(1) = 0;
for i = 1:Nb_seg
    time_c(i+1) = time_c(i) + T(i);
end
end

```

ANNEXE 3

EXEMPLE DE RÉSULTATS DU LADRMQ

Représentation en ligne des résultats d'un test

	Config pattes	Config genoux	Masse corps (Kg)	Vitesse corps (M/s)	Hauteur corps (M)	longueur pas (M)
Pente 0.000 %						
Test # 1	4Barres	<>	90.0	0.6	0.890	0.600
Hauteur pas (M)	Rapport rendement	type cycle	long cuisse (M)	long jambe (M)	Vit max Hanche (RPM)	Vit max Genoux (RPM)
0.030	76.0 %	x	0.500	0.500	75.4	75.8
Vit moy Hanche (RPM)	Vit moy Genoux (RPM)	Acc max Hanche (deg/s ²)	Acc max Genoux (deg/s ²)	Torque max Hanche (Nm)	Torque max Genoux (Nm)	11.3
11.2	11831.7	11952.4	85.0	137.4		
Couple moy Hanche (Nm)	Couple moy Genoux (Nm)	Pression Pompe MPa	Perte Charge MPa	Pression au action MPa	Cylindrée Hanche (cm ³ /rad)	
40.1	56.7	20.8	6.9	13.9	6.1	
Cylindrée Genoux (cm ³ /rad)	Débit max Hanche (GPM)	Débit max Genoux (GPM)	Débit max Total (GPM)	Débit moyen Total (GPM)	Power max Total (Watt)	
9.9	0.7	1.1	1.7	1.0	417.07718	
Puissance moyen Total (Watt)	Spéci Résit Type 3	Spéci Résit Type 4				
268.27100	0.506	3.038				

ANNEXE 4

CAHIER DE CHARGES

Caractéristiques physiques de Capra

Hauteur de la tête		110 à 160 cm
Hauteur d'une patte	Avant	60 à 75 cm
	Arrière	50 à 60 cm
Hauteur du corps		50 cm
Hauteur de clairance d'un pas		40 cm
Largeur		70 cm (porte)
Longueur		90 à 110 cm
Poids maximal du robot		75 kg
Empreinte au sol		Pied de chèvre avec ergot et ouverture des sabots
Matériaux		Les contraintes seront fixées par des questions de températures, rigidité, conception etc.
Enveloppe de travail d'une patte		Minimum pour le réflexe : être capable de bouger dans toutes les directions d'une distance minimale (facilement et rapidement). Le design doit permettre un mouvement au sol avant/arrière et latéral sans qu'il y ait de possibilité de point de singularité. La patte doit pouvoir entrer un peu sous le robot et pouvoir sortir afin d'élargir l'empattement.
Protection du robot		Points d'ancrage embossés requis sur la structure pour attacher blindage, couverture thermique etc.

Source d'énergie

Système d'énergie	Bi-énergie
Source d'énergie	Batteries, essence, gaz, piles hydrogène
Autonomie (fonctionnement)	1h30
Autonomie (Distance parcourue)	1.0 km
Emission tolérée	Co2, non nocif pour l'homme
Bruit	< 45 db

Performances et capacités

Longueur du pas	Pas d'un homme min. (à définir selon optimisation)
Vitesse de marche	0 à 1 m/s (3,6 km/h)
Vitesse de course	0 à 2 m/s (7,2 km/h)
Vitesse de marche en escalier	0.25 m/s (0.9 km/h)
Rayon de courbure à la	2 à 5 m pour une vitesse de 2 m/s

vitesse maximale		
Poids transportable		100 kg
Température supportable	Minimum	-40 degrés
	Maximum	+85 degrés
Surface de transport		Un homme doit pouvoir s'asseoir dessus
Type d'obstacles à franchir		Minimum fait par un homme (escalier, roche, etc.)
Capacité de sauter		Sur place et saut permettant le trot
Distance de télé opération		500 m

Équipement	
Compartiment de transport	Surface d'attache sur le dos 30 cm par 60 cm
Système embarqué	Tous les systèmes sont intégrés et ils communiquent les informations sur l'environnement par ondes radio.
Manipulateur	2 bras articulés permettant de soulever une charge de 10 kg, et d'agripper un homme pour le tirer au niveau du sol.

ANNEXE 5

AUTRES RÉSULTATS DU LADRMQ

Tableau VI Annexe.1

Terrain plat

Masse constante à 175 Kg

Forme	Vitesse	Hauteur	longueur	Hauteur	RR	long	long	Puissance	Spéci
genoux	corps	corps	pas	pas		cuisse	jambe	moyenne	Résit
	(M/s)	(M)	(M)	(M)		(M)	(M)	(Watt)	Type 4
<>	0.2	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.7	0.3	134.304	0.68453
<>	0.2	0.9	0.45	0.05	82.00%	0.7	0.3	136.9058	0.69779
><	0.2	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.4	0.6	138.0253	0.70349
<>	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.7	0.3	139.2331	0.70965
<>	0.6	0.9	0.45	0.05	76.00%	0.7	0.3	421.452	0.71602
<>	0.6	0.9	0.55	0.05	76.00%	0.7	0.3	422.0401	0.71702
<>	0.2	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.6	0.4	140.7496	0.71738
><	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.4	0.6	140.9623	0.71846
><	1	0.9	0.65	0.05	76.00%	0.4	0.6	711.105	0.72488
<<	0.2	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.4	0.6	142.5122	0.72636
<<	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.7	0.3	142.6502	0.72707
<>	0.6	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.7	0.3	428.3156	0.72769
><	0.6	0.9	0.65	0.05	82.00%	0.4	0.6	428.9743	0.7288
><	0.6	0.9	0.55	0.05	76.00%	0.4	0.6	429.069	0.72897
<>	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.6	0.4	143.1915	0.72982
><	0.6	0.9	0.65	0.05	76.00%	0.4	0.6	431.3405	0.73282
><	0.6	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.4	0.6	431.6195	0.7333
<>	0.2	0.9	0.45	0.05	76.00%	0.7	0.3	143.9586	0.73373
<<	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.6	0.4	144.4047	0.73601
>>	0.2	0.9	0.45	0.05	82.00%	0.7	0.3	145.9929	0.7441
<<	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.5	0.5	146.4154	0.74626
<<	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.4	0.6	146.9553	0.74901
<<	0.2	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.5	0.5	146.9711	0.74909
>>	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.4	0.6	146.9833	0.74915
<>	1	0.9	0.65	0.05	76.00%	0.7	0.3	735.1726	0.74941
<<	0.6	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.4	0.6	444.4064	0.75502
<>	0.2	0.9	0.45	0.05	88.00%	0.7	0.3	148.2778	0.75575
<<	0.2	0.9	0.45	0.05	82.00%	0.4	0.6	148.3211	0.75597
><	0.2	0.9	0.45	0.05	82.00%	0.4	0.6	148.4472	0.75661
<<	0.6	0.9	0.65	0.05	82.00%	0.4	0.6	445.6145	0.75708
><	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.5	0.5	148.5934	0.75736
<>	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.5	0.5	148.9315	0.75908
<<	0.6	0.9	0.65	0.05	82.00%	0.5	0.5	448.0569	0.76122
<<	0.2	0.9	0.45	0.05	88.00%	0.4	0.6	149.3865	0.7614
><	0.2	0.9	0.45	0.05	88.00%	0.4	0.6	149.569	0.76233
<<	1	0.9	0.65	0.05	76.00%	0.4	0.6	748.6554	0.76316
<>	0.2	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.5	0.5	149.7656	0.76333

↔	0.6	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.6	0.4	450.3915	0.76519
↔	0.2	0.9	0.35	0.05	76.00%	0.7	0.3	150.2935	0.76602
↔	1	0.9	0.65	0.05	76.00%	0.6	0.4	752.39	0.76696
×	0.2	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.5	0.5	150.7119	0.76815
<<	0.2	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.6	0.4	150.7152	0.76817
↔	0.6	0.9	0.65	0.05	82.00%	0.7	0.3	452.7527	0.7692
<<	0.6	0.9	0.55	0.05	76.00%	0.4	0.6	452.7577	0.76921
×	0.6	0.9	0.45	0.05	76.00%	0.4	0.6	453.1377	0.76986
<<	0.6	0.9	0.65	0.05	82.00%	0.6	0.4	453.2652	0.77007
>>	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.5	0.5	151.1095	0.77018
↔	0.2	0.9	0.45	0.05	82.00%	0.6	0.4	151.2161	0.77072
×	1	0.9	0.55	0.05	76.00%	0.4	0.6	756.7031	0.77136
>>	0.6	0.9	0.65	0.05	82.00%	0.4	0.6	454.7139	0.77253
↔	0.6	0.9	0.65	0.05	82.00%	0.6	0.4	455.0992	0.77319
×	0.2	0.9	0.55	0.05	76.00%	0.4	0.6	151.9844	0.77464
<<	0.6	0.9	0.65	0.05	76.00%	0.4	0.6	456.0364	0.77478
↔	0.6	0.9	0.55	0.05	76.00%	0.6	0.4	456.4282	0.77545
>>	0.2	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.7	0.3	152.3522	0.77651
>>	0.2	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.6	0.4	152.6487	0.77803
<<	1	0.9	0.65	0.05	76.00%	0.5	0.5	764.1539	0.77895
↔	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.4	0.6	152.9763	0.7797
↔	0.2	0.9	0.45	0.05	88.00%	0.6	0.4	153.0596	0.78012
<<	0.6	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.5	0.5	459.9995	0.78151
>>	0.2	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.4	0.6	153.4185	0.78195
>>	0.2	0.9	0.55	0.05	82.00%	0.5	0.5	153.5063	0.7824
>>	0.2	0.9	0.55	0.05	88.00%	0.6	0.4	153.6133	0.78294
×	0.6	0.9	0.65	0.05	82.00%	0.5	0.5	461.1406	0.78345
↔	0.6	0.9	0.65	0.05	82.00%	0.5	0.5	462.0207	0.78495
>>	0.2	0.9	0.45	0.05	88.00%	0.7	0.3	154.5169	0.78755
×	1	0.9	0.75	0.05	76.00%	0.4	0.6	772.6472	0.78761

Tableau VII Annexe.2

Terrain varié

Forme	Masse	Vitesse	Hauteur	longueur	Hauteur	RR	long	long	Puissance	Spéci
genoux	Corps	corps	corps	pas	Pas		cuisse	jambe	moyenne	Résit
	(Kg)	(M/s)	(M)	(M)	(M)		(M)	(M)	(Watt)	Type 4
>>	90	0.4	0.8	0.46	0.05	76.00%	0.3	0.7	186.08605	3.1615
>>	90	0.7	0.8	0.5	0.05	76.00%	0.3	0.7	329.17255	3.19569
>>	90	0.7	0.8	0.46	0.05	76.00%	0.3	0.7	329.49174	3.19879
>>	90	0.4	0.8	0.42	0.05	76.00%	0.3	0.7	189.39284	3.21768
>>	90	0.7	0.8	0.54	0.05	76.00%	0.3	0.7	332.84327	3.23133
>>	90	0.4	0.8	0.5	0.05	76.00%	0.3	0.7	191.21308	3.24861
>>	90	0.4	0.8	0.38	0.05	76.00%	0.3	0.7	192.84893	3.2764
<<	90	0.4	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.4	0.6	193.86738	3.2937
>>	90	0.7	0.8	0.58	0.05	76.00%	0.3	0.7	340.07421	3.30153
>>	90	0.7	0.8	0.42	0.05	76.00%	0.3	0.7	341.93472	3.31959
>>	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.3	0.7	99.63431	3.38547
<<	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.3	0.7	100.00402	3.39803
>>	90	1	0.8	0.58	0.05	76.00%	0.3	0.7	505.13705	3.4328
>>	90	1	0.8	0.54	0.05	76.00%	0.3	0.7	509.20166	3.46043
>>	90	0.2	0.8	0.5	0.05	80.00%	0.3	0.7	102.2696	3.47501
<>	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.7	0.3	102.6049	3.48641
>>	90	0.4	0.8	0.34	0.05	76.00%	0.3	0.7	205.64349	3.49377
>>	90	1	0.8	0.5	0.05	76.00%	0.3	0.7	517.31634	3.51557
>>	90	0.7	0.8	0.38	0.05	76.00%	0.3	0.7	362.26371	3.51695
<<	90	0.7	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.4	0.6	362.51243	3.51937
<<	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.4	0.6	103.58975	3.51987
<<	90	0.2	0.8	0.4	0.05	84.00%	0.3	0.7	104.02829	3.53477
>>	90	0.4	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.6	0.4	210.61551	3.57825
>>	90	0.4	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.4	0.6	210.68729	3.57946
<<	90	0.2	0.8	0.6	0.05	84.00%	0.4	0.6	105.42056	3.58208
<<	90	0.2	0.8	0.3	0.05	84.00%	0.3	0.7	105.68154	3.59095
>>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	80.00%	0.3	0.7	105.84741	3.59658
<<	90	0.2	0.8	0.5	0.05	80.00%	0.3	0.7	106.05273	3.60356
>>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	84.00%	0.3	0.7	106.14241	3.60661
>>	90	1	0.8	0.46	0.05	76.00%	0.3	0.7	531.959	3.61508
>>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.3	0.7	106.66756	3.62445
>>	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.7	0.3	107.0041	3.63589
<<	90	0.2	0.8	0.4	0.05	84.00%	0.4	0.6	107.19527	3.64238
<<	90	0.2	0.8	0.4	0.05	80.00%	0.3	0.7	107.22526	3.6434
<>	90	0.2	0.8	0.5	0.05	80.00%	0.7	0.3	108.35499	3.68179
<<	90	0.2	0.8	0.3	0.05	76.00%	0.3	0.7	108.42872	3.68429
<>	90	0.4	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.6	0.4	217.49687	3.69516
<>	90	0.4	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.4	0.6	217.80681	3.70042
<>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	80.00%	0.7	0.3	109.16315	3.70925
<>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	84.00%	0.7	0.3	109.29744	3.71381

<<	90	0.2	0.8	0.5	0.05	80.00%	0.4	0.6	109.315	3.71441
>>	90	0.2	0.8	0.6	0.05	84.00%	0.4	0.6	109.57052	3.72309
>>	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.6	0.4	109.76135	3.72957
>>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	84.00%	0.7	0.3	110.22025	3.74517
<<	90	0.2	0.8	0.6	0.05	80.00%	0.4	0.6	110.61526	3.75859
>>	90	0.2	0.8	0.3	0.05	84.00%	0.7	0.3	110.8669	3.76714
><	90	0.4	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.6	0.4	221.91894	3.77028
><	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.4	0.6	110.97968	3.77097
><	90	0.4	0.8	0.3	0.05	76.00%	0.3	0.7	221.97697	3.77127
><	90	0.7	0.8	0.34	0.05	76.00%	0.3	0.7	391.31964	3.79904
<<	90	0.2	0.8	0.4	0.05	80.00%	0.4	0.6	111.83967	3.80019
<<	90	0.2	0.8	0.3	0.05	80.00%	0.3	0.7	111.87871	3.80152
><	90	0.7	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.4	0.6	392.42866	3.8098
>>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	84.00%	0.6	0.4	112.53872	3.82395
<>	90	0.2	0.8	0.6	0.05	84.00%	0.6	0.4	112.55411	3.82447
<>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.7	0.3	112.61724	3.82661
<<	90	0.2	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.3	0.7	112.63343	3.82716
<>	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.6	0.4	112.68505	3.82892
<<	90	0.4	0.8	0.3	0.05	76.00%	0.4	0.6	225.73815	3.83517
>>	90	0.2	0.8	0.3	0.05	76.00%	0.7	0.3	113.12693	3.84393
><	90	1	0.8	0.42	0.05	76.00%	0.3	0.7	568.15125	3.86103
>>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	80.00%	0.7	0.3	113.81417	3.86728
<<	90	0.2	0.8	0.5	0.05	76.00%	0.4	0.6	113.87176	3.86924
>>	90	0.2	0.8	0.6	0.05	84.00%	0.6	0.4	113.94999	3.8719
<<	90	0.4	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.6	0.4	228.80029	3.88719
><	90	0.4	0.8	0.46	0.05	76.00%	0.5	0.5	228.93125	3.88942
<>	90	0.7	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.4	0.6	401.97318	3.90246
><	90	0.7	0.8	0.46	0.05	76.00%	0.5	0.5	402.15125	3.90419
><	90	0.2	0.8	0.4	0.05	84.00%	0.4	0.6	114.98415	3.90704
><	90	0.2	0.8	0.3	0.05	76.00%	0.3	0.7	115.11375	3.91144
><	90	0.4	0.8	0.42	0.05	76.00%	0.5	0.5	230.34223	3.91339
><	90	0.2	0.8	0.6	0.05	80.00%	0.4	0.6	115.42433	3.922
>>	90	0.7	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.6	0.4	404.37798	3.92581
<<	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.7	0.3	115.59448	3.92778
>>	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.3	0.7	115.61439	3.92845
<>	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.3	0.7	115.98409	3.94102
><	90	0.7	0.8	0.5	0.05	76.00%	0.5	0.5	406.45113	3.94594
><	90	0.2	0.8	0.5	0.05	80.00%	0.4	0.6	116.56761	3.96084
<>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	84.00%	0.6	0.4	116.77435	3.96787
>>	90	0.4	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.4	0.6	234.62672	3.98618
><	90	0.2	0.8	0.5	0.05	76.00%	0.4	0.6	117.4321	3.99022
<>	90	0.2	0.8	0.3	0.05	76.00%	0.7	0.3	117.61994	3.9966
<<	90	0.2	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.4	0.6	117.62072	3.99663
><	90	0.4	0.8	0.38	0.05	76.00%	0.5	0.5	235.34588	3.9984
<<	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.5	0.5	117.71291	3.99976
><	90	0.2	0.8	0.4	0.05	80.00%	0.4	0.6	117.74072	4.0007

><	90	0.4	0.8	0.42	0.05	76.00%	0.7	0.3	235.62755	4.00319
>>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	80.00%	0.6	0.4	117.83674	4.00397
>>	90	0.2	0.8	0.3	0.05	80.00%	0.7	0.3	118.16459	4.01511
>>	90	0.2	0.8	0.5	0.05	80.00%	0.7	0.3	118.20364	4.01643
<>	90	0.7	0.8	0.4	0.05	76.00%	0.6	0.4	414.2124	4.02128
>>	90	0.2	0.8	0.5	0.05	80.00%	0.6	0.4	118.80754	4.03695
><	90	0.4	0.8	0.38	0.05	76.00%	0.7	0.3	237.73011	4.03891
><	90	0.2	0.8	0.3	0.05	84.00%	0.3	0.7	118.90628	4.04031
<>	90	0.2	0.8	0.5	0.05	84.00%	0.5	0.5	119.05248	4.04528
<>	90	0.2	0.8	0.3	0.05	76.00%	0.3	0.7	119.124	4.04771
>>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	80.00%	0.3	0.7	119.35477	4.05555
><	90	0.4	0.8	0.46	0.05	76.00%	0.7	0.3	238.9532	4.05969
><	90	0.4	0.8	0.5	0.05	76.00%	0.5	0.5	239.25388	4.0648
<>	90	0.2	0.8	0.4	0.05	80.00%	0.6	0.4	119.65003	4.06558

ANNEXE 6

RÉSULTATS COMPARATIFS DES CONFIGURATIONS

	Masse	Vitesse	RR
	corps	corps	
	(Kg)	(M/s)	
Tous les Tests	90	1	76%

Tableau VIII Annexe.3

Influence de la configuration des genoux

	Forme	Hauteur	Longueur	Hauteur	long	long	Spéci
	genoux	corps	pas	pas	cuisse	jambe	Résit
		(M)	(M)	(M)	(M)	(M)	Type 4
Test # 1	<>	0.89	0.45	0.030	0.525	0.475	3.69001
	><	0.89	0.45	0.030	0.525	0.475	3.79066
	>>	0.89	0.45	0.030	0.525	0.475	3.75453
	<<	0.89	0.45	0.030	0.525	0.475	3.72614
Test # 2	<>	0.89	0.5	0.030	0.525	0.475	3.46212
	><	0.89	0.5	0.030	0.525	0.475	3.55501
	>>	0.89	0.5	0.030	0.525	0.475	3.53123
	<<	0.89	0.5	0.030	0.525	0.475	3.4859
Test # 3	<>	0.89	0.55	0.030	0.525	0.475	3.20603
	><	0.89	0.55	0.030	0.525	0.475	3.31951
	>>	0.89	0.55	0.030	0.525	0.475	3.28924
	<<	0.89	0.55	0.030	0.525	0.475	3.2363
Test # 4	<>	0.89	0.6	0.030	0.525	0.475	3.00667
	><	0.89	0.6	0.030	0.525	0.475	3.12285
	>>	0.89	0.6	0.030	0.525	0.475	3.10502
	<<	0.89	0.6	0.030	0.525	0.475	3.0245
Test # 5	<>	0.89	0.65	0.030	0.525	0.475	2.88737
	><	0.89	0.65	0.030	0.525	0.475	2.99677
	>>	0.89	0.65	0.030	0.525	0.475	3.00218
	<<	0.89	0.65	0.030	0.525	0.475	2.88196
Test # 6	<>	0.89	0.7	0.030	0.525	0.475	2.87115
	><	0.89	0.7	0.030	0.525	0.475	2.95965
	>>	0.89	0.7	0.030	0.525	0.475	2.97886
	<<	0.89	0.7	0.030	0.525	0.475	2.85195
Test # 7	<>	0.9	0.45	0.030	0.525	0.475	3.52424
	><	0.9	0.45	0.030	0.525	0.475	3.61914
	>>	0.9	0.45	0.030	0.525	0.475	3.58835
	<<	0.9	0.45	0.030	0.525	0.475	3.55502
Test # 8	<>	0.9	0.5	0.030	0.525	0.475	3.29508
	><	0.9	0.5	0.030	0.525	0.475	3.37976
	>>	0.9	0.5	0.030	0.525	0.475	3.36134
	<<	0.9	0.5	0.030	0.525	0.475	3.3135
	<>	0.9	0.55	0.030	0.525	0.475	3.03804

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Deblois, S., Lambert, G., Lessard, P., Lupien, S., Mercier, Y., Sankar, T. (2001). *Design of Capra - A quadruped Robot With Improved Agility*, ASME, Design automation conference proceeding 2001 Pittsburgh.
- [2] Lupien, S., Lessard, P., Demers, J.C., Lambert, G., Bigras, P., Sankar, T. (2001). *Versatile robot platform for hazardous environment and automation application*. 2001 International Symposium on Robotics, Proceedings, Montréal, pp. 392-397
- [3] Jalbert, L. (1998). *HydraumasIII: Design mécanique, électrique et hydraulique*. École de technologie supérieure, rapport interne, Montréal, 200 p.
- [4] Jeong, K.M., Yang, T.S., Oh, J.H. (1995). *A Study on the Support Pattern of Quaduped Walking Robot for a Aperiodic Motion*. International Conference on Intelligent Robots and Systems Proceedings, IEEE, pp. 308-313.
- [5] Hirai, K. et al. (1998). *The Development of Honda Humanoid Robot*. International Conference on Robotics & Automation, IEEE, pp. 1321-1326.
- [6] Hirose, S. (1984). A Study of Design and Control of a Quadruped Walking Vehicle, *Intl. Journal of robotics Research*, 3(2), pp. 113 -133.
- [7] Raibert, M.H. et al. (1986). *Running on four legs as though they were one*. IEEE Trans. Robotics & Automation, 2, pp. 70-82.
- [8] Lehtinen, Hannu, (1996). Force control for walking on soft terrains. *Robotica*, 14, Cambridge University Press, 1996, pp. 165-172.
- [9] Ayache, N. (1989). *Vision stéréoscopique et perception multisensorielle: Application à la robotique mobile*. InterEditions, Paris.
- [10] Kimura, H., Fukuoka, Y. (2000). *Adaptive Dynamic Walking of the Quadruped on Irregular Terrain – autonomous adaptation using neural system model*. IEEE Conf. on Robotics and Automation, San Fransisco, pp. 436-443
- [11] Lessard, P. (1998). *Hydraumas III: principes de contrôle*. École de technologie supérieure, rapport interne, Montréal, 100 p.
- [12] Chevallereau, C., Formal'sky, A., Perrin, B. (1997). *Control of a walking robot with feet following a reference trajectory derived from ballistic motion*. Robotics and Automation, IEEE International Conference on Int. Robot System, Vol. 2 , pp.1094–1099.
- [13] K Pai. D., Riessell, L.-M. (1998). *Multiresolution Rough Terrain Motion Planning*. IEEE Transaction on Robotics and Automation, 14(1), pp. 19-32

- [14] Simeon T., Dacre-Wright, B. (1993). *A practical motion planner for all-terrain mobile robots*. Proc. IEEE Int. Conf. Intell. Robots System, pp. 1357-1363
- [15] Dickinson, M. et al. (2000). How Animal Move : An Intergrative View. *Science Magazine*, vol 288, 2000, pp. 100-106.
- [16] Margaria, R. (1976). *Biomechanics and energetics of muscular exercise*. Clarendon press, Oxford.
- [17] Pearson, K., *The Control of Walking*. pp. 72-86.
- [18] Alexander, R. (1990). Three Uses for Springs in Legged Locomotion. *The International Journal of Robotics Research*. 9(2), MIT, pp. 53-61.
- [19] Raibert, M. (1984). *Hopping in Legged Systems – Modeling and Simulation for the Two-Dimensional One-Legged Case*. IEEE Transaction on systems, SMC-14 (3), pp. 451-463.
- [20] McGeer, T. (1990). Passive Dynamic Walking. *The Intenational Journal of Robotics Research*, 9 (2), MIT, pp. 62-82.
- [21] Takanishi, A. et al. (1985). *The realization of dynamic walking by the biped walking robot WL-10RD*. ICAR 85, Department of Mechanical Engineering, Waseda University, Tokyo, Japan, pp. 459-466.
- [22] Miura H. et al. (1984). Dynamic Walk of a Biped. *The International Journal of Robotics Research*, 3 (2), MIT, pp. 60-74.
- [23] Kajita, S. et al. (1996). *Experimental Study of Biped Dynamic Walking*. Control Systems, IEEE, (UC Berkeley), 16 (1), pp. 13-19.
- [24] Dunn, E. et al. (1996). *Foot Placement and Velocity Control in Smooth Bipedal Walking*. International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, IEEE, pp. 578-583.
- [25] Kimura, H. et al. (1996). *Realization of Dynamic Walking and Running of the Quadruped Using Neural Oscillator*. Univ. of Electro-Communications, Japan, 9 p.
- [26] Dunn, E. et al. (1994). *Towards Smooth Bipedal Walking*. International Conference on Robotics and Automation, San Diego, IEEE, pp. 2489-2494.
- [27] Formal'sky A., Chevallereau C., Perrin, B. (2000). On Ballistic Walking Locomotion of a Quadruped. *The International Journal of Robotics research*, 19 (8), August 2000, pp.743-761.
- [28] McNeill Alexander, R. (1989). *Dynamics of Dinosaurs & other extinct giants*. Columbia University Press, pp. 45-59.
- [29] McMahon, T. (1975). Using body size to understand the structural design of animals: quadrupedal locomotion. *Journal of Applied Physiology*, 39 (4), October 1975, pp. 619-627.

- [30] Leger C., Bares J. (1998). *Automated Synthesis and Optimization of Robot Configuration*. ASME Design Engineering Technical Conference, MECH-5945, pp.1-12.
- [31] Paredis C., (1996). *An Agent-Based Approach to the Design of Rapidly Deployable Fault Tolerant Manipulators*. PhD thesis, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University.
- [32] McGeer, T. (1990). *Passive walking with knees*. In: Proc. 1990 IEEE Robotics & Automation Conference, Cincinnati, OH, pp. 1640-1645.
- [33] Kuo, A. D. (1999). Stabilization of lateral motion in passive dynamic walking. *International Journal of Robotics Research*, 18 (9), pp. 917-930.
- [34] Craig, J.J. (1989). *Introduction to robotics : mechanics and control*(2nd ed.). Don Mills, Ont. : Addison-Wesley.
- [35] Asada H. and Slotine, J.-J.E. (1986). *Robot analysis and control*. New York, N.Y. : J. Wiley and Sons.
- [36] Song, S.-M. and Waldron, K. J. (1989). *Machines That Walk: The Adaptive Suspension Vehicle*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts.
- [37] McMahon, T. A. (1984). Mechanics of Locomotion. *International Journal of Robotics Research*, 3(2), pp. 4-28.
- [38] Shaoping Bai, Low, K. H. (1999). *A New Free Gait Generation for Quadrupeds*. Proceedings of the International Conference on Robotics & Automation, IEEE, Detroit, Michigan, 8p
- [39] Seet, G., Zielinska , T. (). *Primary/Secondary Gait*. School of Mechanical and Production Engineering Robotics Research Center (RRC) Nanyang Technological University, Singapore 639798,e-mail: (~143801625, mkhlow}@ntu.edu.sg
- [40] Morecki, A. & Zielinska, T. (1991). *Waking Machines and Elastic Manipulators*. IPPT Polish Academy of Sciences, edition supported by CISM, IFToMM, Udine, Italy. (Polish-English joint edition).
- [41] Hirose, S., Kikuchi, H. and Umetani, Y (1996). The standard circular gait of a quadruped walking vehicle. *Advanced Robotics*, 1(2):143-164.
- [42] Kyung-Min Jeong, Tae-Seok Yang, Jun-Ho Oh, (). *A Study on the Support Pattern of a Quadruped Walking Robot for Aperiodic Motion*. Department of Mechanical Design Engineering, Sunmoon University
- [43] Goswami, A. (1998). *Prediction of postural balance by means of zero moment point (ZMP)*: INRIA Rhone-Alpes Source: ASME. Bioengineering Division. BED, 39, pp. 373-374

- [44] Zhou D. and Low. K. H. (1999). *A Friction Constraint Method for the Force Distribution of Quadruped Robots*. Proceedings of the IEEE ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, Atlanta, USA School of Mechanical and Production Engineering Nanyang Technological University, Singapore 639798
- [45] Duane W., Marhefka and David E. Orin. (1997). *Gait Planning for Energy Efficiency in Walking Machines*. Proceedings of the IEEE Conference on Robotics and Automation Albuquerque, New Mexico, Department of Electrical Engineering The Ohio State University Columbus, OH 43210
- [46] Farritor, S., Dubowsky, S., and Rutman,N., (1996). *On the design of rapidly deployable field robotic systems*. In Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers in Engineering Conferences
- [47] Sims, K., (1994). *Evolving virtual creatures*. In 1994 computer Graphics Proceeding, pp. 43-50
- [48] Ahmadi, M., Buehler, M. (1997). Stable control of a simulated one legged running robot with hip and leg compliance. *IEEE Trans. Robotics and Automation*, 13(1), pp. 96-104.
- [49] Gregorio, P., Ahmadi, M., Buehler, M. (1997). Design, Control, and Energetics of an Electrically Actuated Legged Robot. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 27B(4), pp. 626-634.
- [50] Ahmadi, M. and Buehler, M. (1999). *The ARL Monopod II Running Robot: Control and Energetics*. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Detroit, Michigan, pp. 1689-1694.
- [51] H. Komsuoglu, D. McMordie, U. Saranli, N. Moore, M. Buehler, and D. E. Koditschek, (2001). *Proprioception Based Behavioral Advances in Hexapod Robot*. 2001 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA), pp 3650 - 3655, Seoul, Korea.
- [52] Gabrielli, G. et von Karman, T. H. (1950). What price speed. *Mechanical Engineering*, 72 (5), pp. 775-781.
- [53] Abreu, J.M., Ceres, R., Calderon, L., Jimenez, M.A., Gonzalez-de-Santos, P. (1999). Measuring the 3D-position of a walking vehicle using ultrasonic and electromagnetic waves. *Inst de Automatica Industrial* (Dep of Automatic Control and Sensory Systems) ,Madrid, Spain,SN 0924-4247 , 75 (2), pp. 131-138
- [54] Al-Zaydi, Mohammed Y., Amin, Shamsudin H.M. (1997). *Locomotion simulation of a quadruped robot on general level terrain*. Univ of Technology of Malaysia, IEEE International Conference on Intelligent Engineering Systems, Proceedings, INES, pp. 159-164
- [55] Roston, Gerald P. (1997). *Generic design methodology for stochastic systems in dynamic environments*. Cybernet Systems Corp, Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, 0884-3627, pp. 1716-1721

- [56] Sukhatme, Gaurav S., Brizius, S., Cozy, S., Bekey, George A. (1997). *Strategy for quadruped walking on uneven terrain*. Univ of Southern California, Los Angeles, USA, International Conference on Advanced Robotics, Proceedings, ICAR, 002658, pp 291-296
- [57] Ayache, N. (1989). *Vision stéréoscopique et perception multisensorielle : Application à la robotique mobile*. InterEditions, Paris.
- [58] Voisin, Y., Marzani, F., Diou, A. (2000). *Calibration d'un système de vision par lumière structurée*. , Université de Bourgogne.
- [59] Latombe, J.C. (1991). *Robot Motion Planning*. Kluwer, Norwell, MA.
- [60] Janét, J. A., Luo, R. C., Kay, M. G. (1997). Autonomous mobile robot global motion planning and geometric beacon collection using traversability vectors. *Transactions of the IEEE on Robotics and Automation*, 13 (1), pp. 132-140.
- [61] McGhee, R. B., Frank, A. A. (1968). On stability properties of quadruped creeping gait, *Mathematical Biosciences*, 3, pp. 331-351.
- [62] Garcia, M., Ruina, A., Coleman, M. & Chatterjee, A. (1996). *Passive-dynamic model of human gait*. Proceeding of the Conference on Biomechanics and Neural Control of Movement, pp. 32-33.
- [63] Rosheim, M.E. (1994). *Robot Evolution - The Development of Anthrobotics*. John Wiley and Sons.
- [64] Kusiak, A. (1990). *Intelligent Manufacturing systems*, Prentice Hall international series in industrial and systems Engineering, pp. 102-141.
- [65] Sheth, P.N. et Uicker, J.J. (1972). IMP (Integrated Mechanisms Program), *A computer-aided design analysis system for mechanisms and linkage*, ASME Journal of Engineering for Industry, Vol. 94, pp. 454-464.
- [66] Buehler, M. (2001). Biomechanics, *Legged locomotion.305-500A*, Université McGill, pp 1-26.